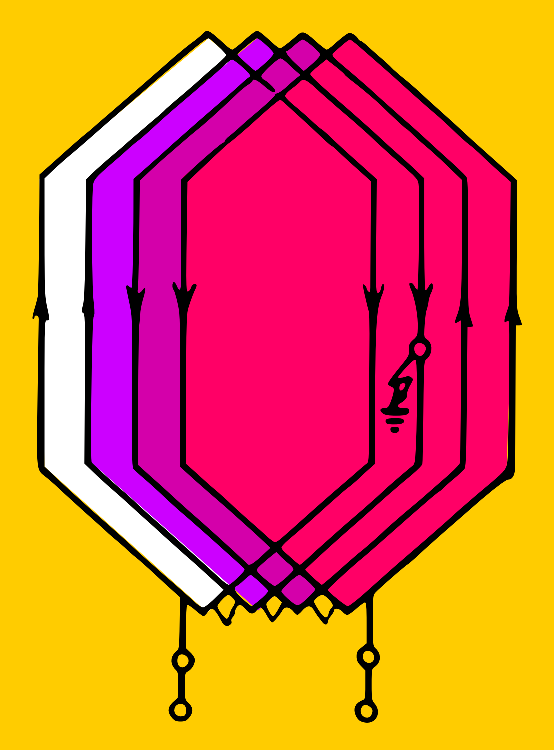
R. Ghemke

DEPANNAGE DES MACHINES ELECTRIQUES



Éditions Mir Moscou

Р. Гемке

Неисправности электрических машин

Издательство «Энергия»
Ленинград

R. Ghemke

DÉPANNAGE des MACHINES ÉLECTRIQUES



Editions Mir
Moscou

Traduit du russe
par V. KOLIMEEV

На французском языке

Chapitre I

DÉFAUTS DES MACHINES À COURANT CONTINU

§ Étincelles anormales aux balais

1-1. Certains ou tous les balais crachent. Le crachement s'accompagne d'un échauffement élevé du collecteur et des balais.

A. *Mauvais calage des balais.*

Vérifier et régler la position des balais d'après les repères du constructeur tracés sur la couronne porte-balais (voir annexe 4).

B. *Distance inégale sur la périphérie du collecteur entre les balais de certaines consoles.*

Vérifier la position des balais sur le collecteur au moyen d'une bande de papier et régler la position des consoles de manière que les balais des consoles consécutives se trouvent à la même distance suivant la circonférence du collecteur. Il est interdit de régler la position des balais en comptant un nombre déterminé de lames du collecteur (voir annexe 4). Sur les machines à un seul sens de marche, les étincelles peu importantes peuvent être éliminées dans certains cas par un léger déplacement de la couronne porte-balais.

C. *Mauvais état des balais et mauvaise position des balais dans leurs gaines.* Les balais de charbon présentent une surface de travail rugueuse et grillée avec des traces de rayures remplies de poudre de cuivre; ils sont mal rodés; leurs bords sont cassés ou brûlés. Les balais métalliques sont encrassés et grillés, leurs extrémités sont matées. Les dimensions des gaines des porte-balais ne correspondent pas à celles des balais (le jeu entre le balai et sa gaine est trop grand

ou trop petit); le contact entre les balais et leurs tresses est mauvais; la section des câbles conducteurs (tresses souples) est insuffisante.

Placer correctement les porte-balais et les balais. Roder avec soin les balais de charbon sur le collecteur, en utilisant une bande de papier de verre (ne pas se servir de toile émeri; voir annexe 4). Laver à l'essence les balais métalliques et les ajuster sur le collecteur.

D. *Mauvaise disposition des porte-balais.* La distance entre la gaine du porte-balais et le collecteur est trop grande; la position du porte-balais à réaction ne correspond pas au sens de rotation de la machine. Par suite de tous ces défauts le balai se trouve coincé dans sa gaine.

Ramener les porte-balais sur leur position correcte (voir annexe 4).

E. *Vibrations de la console de balais mal fixée.*

Resserrer les boulons qui fixent la console sur la couronne.

F. *Portée insuffisante des balais sur le collecteur.*

Appuyer plus fortement les balais; raccourcir, si c'est nécessaire, ou mieux, changer le ressort de pression. Dans les porte-balais permettant le réglage de la pression sur le balai, régler la pression à la valeur voulue. Pour la valeur recommandée de la pression des balais et sa vérification voir annexes 4 et 5.

G. *Portée trop forte des balais sur le collecteur.*

Diminuer la pression des balais, étirer, si c'est nécessaire, ou mieux, changer le ressort de pression. Dans les porte-balais permettant le réglage de la pression sur le balai, régler la pression à la valeur voulue (voir § 1-1, F).

H. *Balais de charbon de qualité non appropriée (trop tendres ou trop durs).* Les balais montés sur la machine sont de qualités différentes (ce qui arrive souvent lors du changement des balais usés). La différente conductance des balais a pour conséquence une répartition inégale du courant dans les balais.

Monter des balais correspondant aux prescriptions du constructeur. Utiliser seulement les balais de la même qualité (pour le choix des balais, voir annexe 5). S'il est impossible d'obtenir les mêmes

balais pour toute la machine, réparti les balais disponibles de manière que chaque console ne renferme que des balais de la même qualité. Si ces mesures n'amènent pas de résultat et les étincelles anormales aux balais subsistent, réduire la charge de la machine.

I. *Balais inégalement chargés à cause de leur pression différente sur le collecteur.*

Régler les porte-balais jusqu'à obtenir pour tous les balais la même pression, à la tolérance près (voir § 1-1, F, G).

J. *Mauvais contact aux bagues collectrices de courant; mauvais serrage des boulons d'induit; encrassement ou oxydation des surfaces de contact aux endroits de connexion des consoles de porte-balais et des bagues collectrices de courant, entre les porte-balais et les consoles ce qui aboutit à une répartition inégale du courant entre les tiges surtout dans les machines à forte intensité de courant.*

Vérifier, nettoyer et rétablir tous les contacts dans les systèmes conducteur et collecteur de courant : entre les consoles de porte-balais et les bagues collectrices de courant, entre les câbles d'amenée de courant et les bagues collectrices de courant, entre les porte-balais et les tiges de porte-balais, entre les balais et les porte-balais. Les endroits de mauvais contact sont généralement faciles à localiser par examen externe parce qu'ils s'échauffent anormalement et présentent souvent une couleur de revenu.

Si l'examen de l'état extérieur ne permet pas de rechercher l'endroit de mauvais contact il convient de mesurer avec un voltmètre de précision les chutes de tension dans tous les endroits susindiqués des systèmes de transmission et de collection du courant; le mauvais contact produira une chute de tension plus élevée.

K. *Vibrations excessives des balais sur le collecteur. La fréquence des oscillations propres des balais coïncide avec celle des oscillations forcées (phénomènes de résonance) provoquées par les lames en saillie du collecteur ou par les vibrations du collecteur.* On constate que la production d'étincelles augmente pour une vitesse de rotation quelconque et que les étincelles deviennent moins intenses lorsqu'on diminue ou augmente cette vitesse.

Renforcer la rigidité de l'ensemble des balais en mettant, par exemple, des plaquettes isolantes (guétinax, textolite) entre les bouts des consoles et en les vissant aux faces terminales de ces dernières.

L. *Pôles principaux et pôles auxiliaires irrégulièrement espacés.*

Vérifier les distances entre les bords des épanouissements des pôles principaux consécutifs ainsi que les distances entre les bords des épanouissements des pôles auxiliaires et des pôles principaux voisins. Conformément aux données expérimentales, dans le premier cas, les distances ne doivent pas différer l'une de l'autre de plus de 1,5 mm pour un induit de diamètre jusqu'à 600 mm et de plus de 2 mm pour un induit de diamètre supérieur à 600 mm, alors que dans le deuxième cas les distances ne doivent pas différer l'une de l'autre de plus de 1 mm.

1-2. Les balais crachent; la génératrice s'amorce difficilement; le moteur démarre difficilement ou tourne à une vitesse anormale; l'enroulement d'induit s'échauffe exagérément dans certains endroits.

A. *Certaines lames consécutives du collecteur sont mises en court-circuit par des bavures qui n'ont pas été ébarbées après le tournage du collecteur.*

En procédant prudemment, enlever toutes les bavures au moyen d'un grattoir bien affûté ; nettoyer au papier de verre et, si c'est nécessaire, tourner le collecteur (voir annexe 4).

B. *Court-circuit entre les jonctions au collecteur ou entre les collerettes provoqué par exemple par des bavures d'étain non enlevées après la soudure.*

Examiner toutes les jonctions au collecteur et toutes les collerettes, éliminer les courts-circuits; enlever avec soin les coulées d'étain.

C. *Défauts d'isolement ou courts-circuits entre spires dans une ou plusieurs bobines d'induit.*

Rechercher les courts-circuits (voir annexe 8) et les éliminer.

Rebobiner ou changer les bobines d'induit défectueuses. Si le nombre de lames du collecteur est assez grand, on peut, à titre temporaire, débrancher

la bobine en mauvais état du collecteur (voir annexe 8). Il n'est pas recommandé de rétablir l'isolation aux endroits de défaut, étant donné que l'échauffement anormal aboutit dans la plupart des cas à une détérioration de toute l'isolation de la bobine défectueuse et donc provoque à la longue de nouveaux courts-circuits entre les spires de la bobine.

1-3. La machine commence à cracher en marche à charge partielle. En marche à vide, la commutation est normale. Les étincelles aux balais deviennent de plus en plus fortes au fur et à mesure que la charge augmente et prennent dans certains cas une valeur inadmissible.

A. *Mauvais calage des balais*; *mauvais état des balais.*

Vérifier et remettre en bon état de marche les balais (voir annexe 4). Pour les causes et remèdes voir aussi § 1-1, A à J.

B. *Alternance incorrecte des pôles principaux et des pôles auxiliaires.*

Vérifier et rétablir l'alternance correcte des polarités des pôles principaux et des pôles de commutation (voir annexe 2).

C. *Excitation dans le mauvais sens de certains pôles principaux ou auxiliaires.*

Assurer l'excitation dans le sens correct de tous les pôles principaux et auxiliaires (voir annexe 2).

D. *L'enroulement des pôles auxiliaires est partiellement ou entièrement shunté par un autre enroulement.*

Localiser et éliminer le court-circuit entre les enroulements.

1-4. Etincelles anormales uniformes à tous les balais en charge. En marche à vide, la commutation est normale.

L'entrefer entre l'induit et certains ou tous les pôles auxiliaires ne correspond pas à la valeur indiquée dans le livret matricule de la machine. Ce phénomène peut se produire dans le cas où au cours de la réparation ou de la révision de la machine on interpose par inadvertance des joints incorrects entre les noyaux des pôles auxiliaires et la culasse.

Vérifier et régler à la valeur prescrite par le constructeur l'entrefer sous tous les pôles auxiliaires. Vérifier, en appliquant la méthode par alimentation d'appoint ou, d'une façon plus grossière, par un déplacement probatoire des balais, si les pôles

auxiliaires sont trop forts ou trop faibles. Si le crachement disparaît ou diminue lorsque les balais sont déplacés dans le sens opposé à la rotation de la génératrice et dans le sens de rotation du moteur, c'est un indice que les pôles auxiliaires sont trop forts; si le crachement devient dans ces cas plus fort, les pôles auxiliaires sont trop faibles. L'entrefer doit être diminué si les pôles auxiliaires sont faibles, et augmenté s'ils sont trop forts. Pour le réglage des pôles auxiliaires, voir annexe 7.

1-5. **Etincelles peu nourries aux balais.** Aucun autre phénomène anormal n'est constaté dans la machine.

Balais de qualité non appropriée.

Monter des balais d'un autre type (voir annexe 5). Si ce crachement peu important ne provoque ni un noircissement du collecteur, ni des dépôts carbonés sur les balais, le changement des balais n'est pas obligatoire.

1-6. **Les étincelles sont plus fortes aux balais d'un pôle qu'aux balais de l'autre.**

A. *Distance inégale entre les balais suivant la circonférence du collecteur ou un autre défaut des balais.*

Régler les balais (voir § 1-1, B, C, F, G, H, J).

B. *Défaut d'isolement ou court-circuit dans l'enroulement de l'un des pôles auxiliaires ou principaux.*

Rechercher la bobine en mauvais état (voir annexe 8), la réparer ou changer.

1-7. **Etincelles errantes et intermittentes en charge.**

Mauvais contact aux balais.

Régler les balais (voir § 1-1, C, F, J).

1-8. **La machine crache, on ne constate un noircissement que de certaines lames du collecteur se trouvant à une distance déterminée l'une de l'autre (suivant le nombre de pôles ou de paires de pôles). Les seules et mêmes lames se noircissent après chaque nettoyage et tournage du collecteur.**

A. *Mauvais contact dans l'induit.* Le plus souvent, ce défaut est constaté dans les connexions entre les bobines d'induit et le collecteur (les ailettes) et a pour cause une mauvaise soudure.

Vérifier avec le plus grand soin l'état de soudure de toutes les connexions entre l'enroulement d'induit et les lames noircies du collecteur. Dessouder et ressouder toutes les connexions en mauvais état

ou de qualité douteuse. Il est rare qu'une mauvaise soudure puisse être détectée par examen superficiel et il est donc recommandé de vérifier les soudures en mesurant les chutes de tension (voir annexe 8). Si une telle vérification ne peut pas être effectuée parce qu'on ne dispose pas d'une source de courant continu ou d'un millivoltmètre, il convient de dessouder et de ressouder tous les conducteurs de l'enroulement d'induit qui aboutissent à des lames noircies du collecteur.

Marquer au pointeau les portions frontales des lames noircies du collecteur afin de faciliter le contrôle ultérieur.

Tourner le collecteur; gratter ou fraiser les lamelles isolantes qui dépassent les lames du collecteur (voir annexe 4).

B. *Certaines lames du collecteur sont en saillie ou en retrait.*

Rectifier le collecteur sur un tour à métaux (voir annexe 4).

C. *Il y a un court-circuit dans l'induit.*

Voir § 1-2, A et B.

D. *Les connexions équipotentielles sont dessoudées.*

Si, après avoir vérifié et remis en bon état les soudures de l'enroulement et des ailettes et tourné le collecteur, on constate que les mêmes et seules lames continuent à se noircir, il convient de vérifier l'état de la soudure des connexions équipotentielles.

E. *Les connexions équipotentielles sont absentes.*

Réaliser les connexions équipotentielles en se conformant aux instructions du constructeur.

F. *Le nombre de connexions équipotentielles est insuffisant.*

Réaliser des connexions équipotentielles complémentaires suivant les instructions du constructeur.

1-9. La machine crache, certaines lames du collecteur se noircissent comme il est indiqué au § 1-8. L'isolation entre deux ou plusieurs lames du collecteur est fortement brûlée. De temps en temps, à des instants où les endroits défectueux du collecteur quittent les balais, on constate des étincelles longues qui jaillissent avec crépitement. Parfois, l'isolation entre les lames du collecteur s'échauffe exagérément aux endroits en mauvais état.

Coupure dans la bobine d'induit connectée entre les lames noircies du collecteur. La coupure se produit le plus souvent dans les connexions entre le collecteur et l'enroulement d'induit et rarement dans l'enroulement lui-même.

Localiser la coupure en vérifiant la continuité du circuit induit (voir annexe 8).

En cas de coupure dans les connexions entre l'enroulement et le collecteur, procéder comme il est indiqué au § 1-8, A. Si la coupure est constatée dans l'enroulement lui-même, remplacer la bobine défectueuse par une bobine neuve. Si le nombre de lames du collecteur est assez élevé, on peut, comme mesure provisoire, mettre en court-circuit deux lames consécutives auxquelles aboutissent l'entrée et la sortie de la bobine fautive (voir annexe 8).

1-10. La machine crache et chaque deuxième ou chaque troisième lame se noircit.

A. *Serrage du collecteur affaibli.*

Resserrer et tourner le collecteur (voir annexe 4).

B. *Les lamelles isolantes dépassent les lames du collecteur.*

Fraiser les lamelles isolantes pour une profondeur de 1,5 à 2 mm; après cela, tourner, si c'est nécessaire, le collecteur et le passer au papier de verre (voir annexe 4).

1-11. La machine crache, on constate un noircissement migratoire des lames du collecteur (après chaque nettoyage du collecteur se noircissent d'autres lames).

A. *Les lamelles isolantes de mica dépassent légèrement certaines lames du collecteur.*

Voir § 1-10, B.

B. *Mauvais état des balais.*

Remettre en bon état les balais.

1-12. La machine crache bien que les balais soient en bon état et correctement calés, le collecteur soit en bon état de propreté et les lamelles isolantes de mica ne dépassent pas les lames du collecteur.

A. *Si l'échauffement de la machine est normal, le crachement est dû à une usure excessive du collecteur. Ce cas se présente surtout dans les machines à basse tension.*

Remplacer le collecteur.

B. *Si l'induit chauffe anormalement (voir § 3-1) on se trouve en présence d'une surcharge de la machine.*

Supprimer la surcharge.

C. *Dans le cas où l'échauffement anormal de l'induit s'accompagne d'un échauffement non uniforme de certaines bobines des pôles principaux, l'on se trouve en présence d'un défaut d'isolement ou d'un court-circuit entre spires dans une ou plusieurs bobines des pôles principaux* (la distorsion du champ magnétique qui en résulte fait circuler des courants d'échange).

Localiser les bobines défectueuses (voir annexe 8), les réparer ou changer.

D. *Si l'échauffement de l'induit est excessif même en marche à vide et les étincelles aux balais d'un pôle sont plus fortes que celles aux balais de l'autre pôle, le défaut est consécutif à un mauvais centrage de l'induit lorsque l'entrefer entre l'induit et certains pôles n'est pas le même.* Ce phénomène peut avoir pour causes une forte usure des coussinets ou, dans le cas des grosses machines, un affaissement non uniforme des socles (lorsque les bâtis de paliers ne sont pas installés sur le socle supportant la carcasse de la machine) ainsi qu'un mauvais centrage de l'induit réalisé lors du montage de la machine.

L'entrefer non uniforme entre l'induit et les pôles provoque une non-uniformité du champ magnétique de sorte que les f.é.m. induites dans les dérivations d'enroulement de l'induit deviennent différentes, ce qui fait circuler des courants égalisateurs internes. Dans le cas d'une non-uniformité considérable des entrefers les courants égalisateurs provoquent (surtout dans les machines à petit nombre de connexions équipotentielles) un échauffement anormal de l'induit et de fortes étincelles aux balais.

Regarnir ou remplacer les coussinets de paliers. Régler les entrefers entre l'induit et les pôles (voir annexe 12), sans modifier l'alignement de l'induit avec la machine accouplée.

1-13. Les balais crachent, trépident et sont anormalement bruyants; le collecteur présente des traces de brûlure; le collecteur se noircit sur toute sa périphérie ou sur sa plus grande partie; la surface du collecteur est sillonnée (ondulée); le collecteur et les balais s'échauffent anormalement.

A. *Le collecteur a une surface rugueuse ou ne tourne pas rond.* Toute la machine vibre. Le collecteur est déformé sous l'action des forces centrifuges; certaines lames du collecteur font saillie sur les autres; le serrage du collecteur est affaibli.

Une usure non uniforme des lames du collecteur peut avoir pour cause une dureté inégale du cuivre (un cas rare).

Vérifier le faux-rond du collecteur (voir annexe 12). Resserrer le collecteur, le rectifier sur un tour, fraiser les lamelles isolantes entre les lames du collecteur (voir annexe 4). Supprimer les vibrations excessives (voir annexe 14).

B. *Les lamelles isolantes dépassent les lames du collecteur.* Ce cas se présente assez fréquemment surtout dans les machines à grande vitesse par exemple dans les excitatrices de turbo-alternateurs.

Fraiser les lamelles isolantes du collecteur (voir annexe 4).

C. *L'usure du collecteur est non uniforme à cause du mauvais calage des balais.*

Assurer le calage correct des balais (voir annexe 4).

1-14. Les balais crachent; le collecteur est recouvert d'une couche d'oxydes qui réapparaît après le nettoyage du collecteur même dans le cas où la machine ne tourne pas.

L'atmosphère de la salle des machines contient des vapeurs d'acides ou des gaz agressifs qui attaquent chimiquement le cuivre du collecteur.

Nettoyer le collecteur à froid avec un papier de verre avant chaque mise en route de la machine (voir annexe 4). Si la machine est équipée de balais en charbon, utiliser, autant que possible, des balais durs. La meilleure solution consiste à installer une autre machine de type fermé (hermétique).

1-15. On observe la production d'étincelles circulaires peu nourries; les étincelles sautent sur la surface du collecteur des balais d'une polarité aux balais de l'autre polarité.

A. *Le collecteur est encrassé par suite d'un graissage trop abondant ou de l'emploi des balais en charbon trop tendres.*

Nettoyer le collecteur avec un chiffon de toile fine non pelucheuse légèrement trempé dans l'essence (mais non imprégné d'essence!) et le passer au papier de verre fin (voir annexe 4); monter des balais plus durs.

B. *Le collecteur est encrassé à cause d'une forte usure des balais due à la surface déformée du collecteur ou à l'emploi de balais de qualité non appropriée. L'encrassement peut être également consécutif à un nettoyage et à un soufflage peu soigné*

de la machine après le rodage des balais ou après la rectification du collecteur ainsi qu'à un mauvais entretien de la machine.

Parfaire la surface rugueuse du collecteur en le passant au papier de verre ou tourner le collecteur et fraiser les lamelles isolantes entre les lames du collecteur (voir annexe 4); remplacer les balais qui ne conviennent pas par des balais neufs recommandés par le constructeur ou procéder comme il est indiqué dans l'annexe 5.

Maintenir le collecteur en parfait état de propreté. Après chaque rodage des balais et chaque rectification du collecteur, nettoyer soigneusement, à l'aide d'un aspirateur et par une insufflation d'air comprimé, le collecteur et les balais.

1-16. Coups de feu circulaire sur la périphérie du collecteur.

A. *Mauvais calage des balais.*

Vérifier les balais et les ramener sur la ligne neutre (voir annexe 4).

B. *Alternance incorrecte des pôles principaux et des pôles auxiliaires (erreur de couplage des pôles auxiliaires à l'induit).*

Vérifier si l'alternance des pôles principaux et des pôles de commutation est correcte (voir annexe 2).

C. *Balais de qualité non appropriée.* Les particules de charbon qui se détachent des balais par suite de leur usure forment des ponts conducteurs entre les lames du collecteur et s'en trouvent portées à incandescence. En cas de courts-circuits, les particules de charbon incandescentes s'arrachent des balais graphiques tendres, ce qui a pour effet la production d'un feu circulaire.

Remplacer les balais trop tendres par des balais plus durs, de préférence, par des balais électrographitiques qui possèdent la meilleure résistance mécanique et supportent facilement les courts-circuits (voir annexe 5).

D. *En cas de court-circuit dans le circuit extérieur, les balais s'échauffent jusqu'à l'incandescence, de sorte qu'une quantité considérable de vapeur conductrice de courant et provoquant une ionisation de l'air environnant s'accumule sous les balais.* Il en résulte l'apparition de petits arcs entre les lames consécutives du collecteur à l'instant où les lames quittent les balais. Si le court-circuit persiste assez long-

temps, de tels arcs jaillissent entre les lames consécutives sur toute la périphérie du collecteur et se transforment donc en un feu circulaire.

Pour la protection contre les courts-circuits, il convient d'installer un disjoncteur à action rapide. Les machines sujettes à des courts-circuits fréquents doivent être équipées de balais électrographitiques (voir annexe 5).

1-17. On voit apparaître de forts crachements au collecteur en cas d'inversion du sens de rotation du moteur.

Le changement du sens de rotation se fait trop vite.

Eviter de changer le sens de rotation du moteur d'une façon brusque. Si ce remède ne convient pas d'après les conditions de la production, contacter le constructeur pour les recommandations.

1-18. Les étincelles aux balais sont plus grandes pour un sens de rotation du moteur que pour l'autre; le moteur a une tendance permanente à cracher pour un seul sens de rotation; la vitesse de rotation du moteur est plus élevée dans un sens que dans l'autre.

A. *Les balais sont décalés de la ligne neutre.*

Vérifier et ramener les balais sur la ligne neutre (voir annexe 4).

B. *Absence de pôles auxiliaires dans un moteur d'ancienne construction.*

Employer, pour le fonctionnement à deux sens de marche, seulement des moteurs comportant des pôles de commutation.

§ 2. Echauffement anormal de toute la machine

2-1. Tous les organes de la machine s'échauffent exagérément mais d'une façon uniforme.

A. *La machine est surchargée.*

Si la charge de la machine ne peut pas être réduite, consulter le constructeur sur la charge maximale admissible de la machine.

Si la commutation est normale, renforcer la ventilation de la machine par l'installation d'un ventilateur complémentaire ou par le montage des ailettes de ventilation sur l'induit (consulter le constructeur sur les procédés possibles permettant de renforcer la ventilation).

B. *Le moteur destiné à assurer un service temporaire ou un service intermittent périodique (par exemple un moteur de grue ou un moteur de traction) est exploité en service continu.*

Respecter le service nominal de la machine.

C. *Les canaux de ventilation de la machine sont obstrués, le fer actif et les enroulements sont recouverts d'une couche calorifuge de fibres fines et de poussières.* Ce cas se présente le plus fréquemment dans les ateliers de textiles, de ciment, de papier et de bois.

Nettoyer soigneusement la machine et la souffler à l'air comprimé (sous une pression non supérieure à 0,2 MPa [1])). Avant l'insufflation, s'assurer que l'air est propre et sec. Pour l'insufflation d'air ne pas se servir d'embouts à bords vifs qui peuvent détériorer l'isolation des enroulements. Veiller à ce que la poussière soit évacuée vers l'extérieur et non chassée d'une partie de la machine dans une autre.

D. *Choix incorrect du sens de rotation pour une machine comportant un ventilateur à ailettes inclinées ce qui réduit notablement le débit d'air de refroidissement.*

Inverser le sens de rotation de la machine ou changer l'inclinaison des ailettes du ventilateur.

E. *Le canal ou la tuyauterie d'air (dans le cas des machines refroidies par l'air amené de l'extérieur) présente une section insuffisante ou comporte trop de coudes.*

Augmenter la section du canal ou de la tuyauterie jusqu'à la valeur exigée; diminuer le nombre de coudes.

F. *Les épurateurs d'air sont obstrués.*

Nettoyer de la boue et de la poussière les filtres en tissu. Ce nettoyage se fait le plus commodément à l'aspirateur. Quant aux filtres d'air à huile minérale, les décrasser tout d'abord au pétrole de lavage, les laver ensuite à une solution de bicarbonate de soude et d'eau chaude et les remplir finalement d'huile fraîche.

G. *Défaut du refroidisseur d'air* (voir § 47).

Dans une machine ventilée en circuit fermé, l'absence de calorifugeage de la canalisation d'air de sortie a pour effet d'augmenter l'échauffement

[1]) 1 kgf/cm² ≅ 0,1 MPa (à 1,97 % près).

de la machine. Dans de tels cas, il est recommandé d'assurer l'isolement thermique de la canalisation d'air de sortie.

§ 3. Echauffement excessif de l'enroulement d'induit

3-1. Tout l'enroulement d'induit s'échauffe uniformément, la machine a tendance à cracher; la génératrice débite et le moteur consomme un courant supérieur à la valeur nominale; la vitesse de rotation du moteur est inférieure à la vitesse nominale bien que la tension du réseau d'alimentation soit normale (ce dernier cas ne concerne pas les moteurs à excitation composée dont la vitesse de rotation peut s'élever lorsque la charge augmente).

Voir § 2-1, A.

3-2. En marche à charge normale, la machine tourne à une vitesse réduite; tout l'enroulement d'induit s'échauffe uniformément.

La ventilation de la machine est insuffisante à cause de mauvaises conditions.

Ramener la vitesse de rotation de la machine à sa valeur nominale: dans le cas d'une génératrice, en augmentant la vitesse du moteur d'entraînement ou en assortissant des poulies s'il y a une transmission par courroie et, dans le cas des moteurs, en augmentant la résistance de réglage placée dans le circuit de l'enroulement dérivation, c'est-à-dire en affaiblissant le champ.

3-3. Les étincelles aux balais d'un pôle sont plus fortes que les étincelles aux balais des autres pôles.

Voir § 1-12, D.

3-4. Les étincelles sont plus fortes aux balais d'un pôle qu'aux balais des autres pôles. La génératrice ne donne sa tension normale qu'à une vitesse supérieure à sa vitesse nominale. Le moteur tourne trop vite pour la tension d'alimentation nominale et la valeur correcte de la résistance du rhéostat de réglage. Les bobines inductrices s'échauffent uniformément.

La cause la plus probable est l'alternance incorrecte des pôles principaux due à une erreur de couplage de l'une ou de plusieurs bobines ce qui a pour effet la production d'un champ magnétique anormal et donc la circulation de courants égalisateurs dans l'induit.

Rétablir l'alternance correcte des pôles (voir annexe 2).

3-5. **Mêmes constatations que celles indiquées au § 3-4, mais l'échauffement des bobines inductrices n'est pas uniforme.**

Un court-circuit dans l'une ou plusieurs bobines des pôles principaux déforme le champ magnétique.

Voir § 1-6, B ainsi que § 1-12, C.

3-6. **La génératrice s'amorce difficilement. Le moteur démarre difficilement, dans certains cas, par à-coups.** Dans une génératrice à excitation séparée, l'induit s'échauffe exagérément tout de suite après la mise à l'excitation, l'échauffement des bobines étant non uniforme. Généralement, l'induit dégage de la fumée. Les lames du collecteur auxquelles aboutissent les extrémités de la bobine défectueuse échauffée de l'induit brûlent; si l'induit comporte des connexions équipotentielles, les lames séparées des premières par un double intervalle polaire grillent elles aussi.

A. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre spires dans une ou plusieurs bobines d'induit.*

Localiser les bobines défectueuses (voir annexe 8), les réparer ou remplacer.

B. *Les bavures produites lors du tournage du collecteur ont provoqué un court-circuit dans l'enroulement d'induit à travers les lames du collecteur.*

Voir § 1-2, A.

C. *Il y a un court-circuit dans l'enroulement d'induit à travers certaines ailettes ou certaines collerettes mises en contact.*

Voir § 1-2, B.

§ 4. Echauffement anormal du collecteur et des balais

4-1. **Les balais trépident et crachent; la surface du collecteur est piquée ou érodée; les balais sont anormalement bruyants.**

Voir § 1-13, A, B, C.

4-2. **Le collecteur se noircit bien que les balais ne crachent pas, la surface du collecteur est lisse.**

A. *Balais de qualité non appropriée.*

Vérifier l'échauffement du collecteur avec des balais d'autres qualités.

B. Voir § 1-1, G.

4-3. Les balais crachent; les bords des balais sont parfois portés à incandescence et brûlent; les accessoires et les tresses en cuivre de certains balais s'échauffent exagérément et, dans certains cas, brûlent.

Mauvais contacts aux balais et dans le circuit des conducteurs et, comme résultat, une répartition non uniforme du courant entre les balais.

Voir § 1-1, J.

§ 5. Echauffement anormal des inducteurs

5-1. Toutes les bobines inductrices s'échauffent uniformément au-dessus de la norme; le moteur tourne trop lentement pour une tension d'alimentation normale.

Le courant d'excitation est excessif; la résistance additionnelle dans le circuit d'excitation de l'enroulement dérivation est trop faible ou même inexistante. Il se peut que lors de la réparation, les bobines inductrices ont été couplées en parallèle et non en série (un cas rare).

Régler la résistance additionnelle à une valeur telle que pour la charge et la tension d'alimentation nominales la vitesse de rotation du moteur corresponde à celle indiquée sur la plaque signalétique de la machine.

S'assurer que le couplage des bobines inductrices est correct.

5-2. Toutes les bobines s'échauffent uniformément; la génératrice tournant à la vitesse normale donne une tension trop élevée.

Le courant d'excitation est excessif. Le régulateur de champ est en mauvais état ou ne convient pas à la machine.

Vérifier le bon état du régulateur de champ. Si aucun défaut n'est constaté, remplacer le régulateur de champ par un autre ayant une plus grande résistance.

5-3. Certaines bobines s'échauffent anormalement, tandis qu'une partie de bobines reste froide. Les balais crachent. L'induit s'échauffe anormalement.

A. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre spires, dans une ou plusieurs bobines inductrices.* Le courant d'excitation s'élève par suite de la diminution de la résistance de l'enrou-

lement d'excitation due au court-circuit dans les bobines défectueuses.

Voir § 1-6, B.

B. *Court-circuit entre l'enroulement dérivation d'une part et l'enroulement des pôles auxiliaires ou l'enroulement série d'autre part.* Il en résulte un shuntage d'une partie de bobines et donc une augmentation du courant d'excitation.

Débrancher les extrémités des enroulements dérivation et série et localiser, à l'aide d'une lampe de contrôle ou d'un mégohmmètre, l'endroit de court-circuit. Si cet endroit est facilement accessible, supprimer le court-circuit en rétablissant l'isolation; sinon, rebobiner ou remplacer la bobine défectueuse.

§ 6. Tension anormale de la génératrice

6-1. La génératrice ne s'amorce plus. Une aiguille aimantée présentée près des épanouissements polaires ne donne aucune indication précise sur la polarité (un même pôle de la machine attire aussi bien l'extrémité nord que l'extrémité sud de l'aiguille).

La génératrice a perdu son magnétisme rémanent.

Aimanter la machine depuis une source de courant indépendante (batterie d'accumulateurs, tableau de distribution commun ou autre génératrice). Afin de conserver la polarité correcte de la machine, faire passer le courant magnétisant dans l'enroulement d'excitation dérivation dans le sens correspondant au fonctionnement normal de la génératrice (voir annexe 6).

Pour éviter tout risque de détérioration de l'isolation de l'enroulement, établir et interrompre le courant magnétisant à travers un rhéostat.

6-2. Une aiguille aimantée présentée près des épanouissements polaires indique une polarité correcte de la génératrice mais celle-ci ne produit pas de courant (même après une aimantation).

A. *Mauvais calage des balais.* Lors du montage des machines neuves expédiées en état démonté par le constructeur ainsi que pendant l'assemblage des machines qui ont été démontées pour l'inspection ou pour la réparation, les porte-balais sont parfois installés incorrectement, dans

le mauvais sens, de sorte que les balais se trouvent fortement décalés de la ligne neutre bien que la position de la couronne porte-balais corresponde aux repères du constructeur.

Vérifier le calage des balais et les ramener sur la ligne neutre suivant les repères du constructeur (voir annexe 4).

B. *Mauvais sens de rotation de la machine ou erreur de couplage entre l'enroulement dérivation et l'induit.* Il en résulte que l'action de l'auto-excitation de la machine se trouve opposée à l'action du magnétisme rémanent.

Inverser le sens de rotation ou, en cas d'une erreur de couplage, connecter l'enroulement dérivation sur l'induit conformément au sens de rotation d'après le schéma adjoint à la machine, ou si ce schéma n'est pas disponible, d'après le schéma normal (voir annexe 1).

C. *Mise à la masse en deux endroits de l'enroulement d'excitation dérivation.*

Localiser et supprimer les mises à la masse.

D. *Défaut d'isolement ou court-circuit dans une ou plusieurs bobines inductrices.*

Voir § 1-6, B.

E. *Court-circuit dans l'enroulement d'induit, entre les lames du collecteur ou entre les ailettes.*

Voir § 3-6, A, B, C.

F. *Coupure ou mauvais contact dans l'enroulement d'induit.*

Voir § 1-8, A.

G. *Erreur de couplage entre le régulateur de champ et la machine.*

Vérifier et rétablir le couplage correct du régulateur de champ d'après le schéma du constructeur (voir annexe 1).

H. *Coupure ou mauvais contact dans le circuit d'excitation. Valeur trop élevée (supérieure à celle de la résistance critique) de la résistance du circuit d'excitation.* Ce défaut se présente le plus fréquemment dans le régulateur de champ et rarement dans l'enroulement de la machine. Bien souvent, la cause en est l'encrassement des contacts du régulateur.

Localiser la coupure ou le mauvais contact (voir annexe 8) et réparer. Si la coupure est dans l'enroulement, rebobiner ou remplacer la bobine défec-

tueuse. En cas d'une résistance trop forte du circuit d'excitation, diminuer la valeur de la partie non réglable de la résistance dans le circuit d'excitation.

Examiner et nettoyer les contacts du régulateur de champ.

I. Voir § 5-3, B.

6-3. La génératrice ne s'amorce qu'en cas d'une forte pression des balais sur le collecteur.

A. *Résistance de contact trop forte entre le collecteur et les balais par suite de l'encrassement.*

Voir § 1-14, 15.

B. Voir § 1-10, B.

C. Voir § 1-1, F.

6-4. La génératrice ne donne pas sa tension normale.

A. *La machine ne tourne pas à sa vitesse normale.*

Vérifier la vitesse de rotation du moteur d'entraînement et le choix correct des poulies en cas d'une transmission par courroie.

B. Voir § 1-1, A.

C. Voir § 6-2, II.

D. *Erreur de couplage entre certaines bobines inductrices.*

Vérifier la polarité des pôles principaux (voir annexe 2).

E. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre spires dans l'une ou plusieurs bobines de l'enroulement d'excitation en dérivation.*

Voir § 1-6, B.

6-5. La génératrice donne sa tension normale en marche à vide mais une tension trop basse en charge.

A. *Baisse de la vitesse du moteur d'entraînement ou patinage important de la courroie d'entraînement.* Si le moteur d'entraînement est un moteur asynchrone, son défaut (voir § 16-8 à 16-10) peut être consécutif à une baisse de la vitesse de rotation.

Rechercher et supprimer les causes de la vitesse réduite de rotation du moteur d'entraînement en charge ou du patinage inadmissible de la courroie. Vérifier le circuit rotorique du moteur asynchrone (voir § 16-8 à 16-10).

B. *Erreur de couplage des pôles auxiliaires*, c'est-à-dire, alternance incorrecte des pôles principaux et des pôles de commutation. Une telle erreur provoque, tout comme une erreur de couplage de l'enroulement série, une forte chute

de tension lors de la marche en charge et s'accompagne généralement de la production d'étincelles anormales aux balais.

Vérifier la polarité des pôles auxiliaires (voir annexe 2).

C. *Erreur de couplage de l'enroulement série dans une génératrice à excitation composée.* Le champ magnétique produit par l'enroulement série est en opposition avec le champ magnétique développé par l'enroulement dérivation.

Inverser les connexions de l'enroulement série. Vérifier la polarité des pôles : *a* — en mettant sous tension le seul enroulement dérivation, *b* — en mettant sous tension le seul enroulement série (voir annexe 2).

6-6. En marche à vide, la génératrice donne sa tension normale et les balais ne crachent pas. Lorsque la génératrice est couplée sur un réseau, sa tension baisse bien qu'elle tourne à sa vitesse normale. L'abaissement de tension s'accompagne généralement de la production de fortes étincelles aux balais.

Mise à la masse de l'enroulement dérivation ou du régulateur de champ. Dans le cas où un pôle du réseau est mis à la terre en permanence ainsi que dans le cas d'une mise à la terre accidentelle consécutive à un défaut quelconque, l'enroulement dérivation de la machine se trouve shunté et le champ inducteur est donc affaibli.

Localiser et supprimer la mise à la masse de l'enroulement dérivation ou du régulateur de champ (voir annexe 8). S'il y a mise à la masse à l'intérieur d'une bobine, la rebobiner ou remplacer par une neuve.

6-7. La génératrice donne une tension trop élevée aussi bien en marche à vide qu'en charge. Aucun autre défaut de fonctionnement n'est constaté.

A. *Vitesse de rotation excessive.*

La ramener à la valeur normale.

B. *Résistance trop faible du régulateur de champ.*

Intercaler dans le circuit d'excitation de la génératrice une résistance additionnelle fixe, en la plaçant en série avec le régulateur de champ ou remplacer ce dernier par un autre régulateur ayant une plus forte résistance.

C. *Couplage des bobines inductrices en parallèle au lieu d'être en série* (en cas rare).

Si le couplage correct des bobines est mis en doute, contacter le constructeur.

6-8. En marche à vide, la génératrice donne sa tension normale et le fonctionnement du régulateur de champ est bon. Lorsque la génératrice est couplée sur un réseau, sa tension s'élève, la manœuvre du régulateur de champ est sans effet sur la valeur de la tension. Dans certains cas, seule une partie du régulateur est inopérante, dans d'autres cas, c'est tout le régulateur qui est inefficace.

Mise à la masse du régulateur de champ ou mise à la terre du conducteur reliant le régulateur de champ à l'enroulement dérivation de la génératrice. Si le réseau sur lequel débite la génératrice est mis à la terre (de façon délibérée ou accidentelle), le régulateur de champ se trouve shunté, en partie ou en totalité, le courant d'excitation de la génératrice augmente de même que la tension.

Localiser et supprimer la mise à la masse (voir annexe 8).

§ 7. Répartition inégale des charges et fonctionnement instable des génératrices couplées en parallèle

7-1. En cas de variation de la charge de l'ensemble des génératrices dérivation, couplées en parallèle, elle se répartit inégalement et non proportionnellement aux puissances nominales des génératrices. Aux heures de pointe, l'une des génératrices assume la plus grande partie de la charge.

Les caractéristiques externes des génératrices sont différentes (leurs tensions varient différemment en fonction du débit) ou une variation différente de la vitesse de leurs moteurs d'entraînement.

Pour obtenir une répartition uniforme automatique des charges, proportionnelle aux puissances nominales des génératrices dérivation, couplées en parallèle, il est nécessaire que leurs tensions varient d'une même manière et que leurs moteurs d'entraînement présentent une même baisse relative de vitesse entre la marche à vide et la marche à charge nominale. Si ces conditions ne sont pas réalisées on obtient une répartition uniforme des charges entre les génératrices par un réglage approprié de leur excitation.

Les charges peuvent être réparties de façon uniforme, proportionnelle aux puissances des génératrices à caractéristiques externes différentes, soit par une augmentation de la chute de tension de la génératrice qui prend une plus grande charge, soit par une diminution de la chute de tension de la deuxième génératrice. On peut y arriver par un léger déplacement de la couronne porte-balais à condition de ne pas provoquer des étincelles anormales aux balais. La chute de tension de la génératrice augmente, si les balais sont décalés de la ligne dans le sens de rotation de l'induit, et diminue, lorsque les balais sont décalés en sens inverse.

Si, par modification du calage des balais, l'on n'arrive pas à obtenir une répartition uniforme des charges, on peut recommander, en qualité de mesure provisoire, d'intercaler une résistance additionnelle de faible valeur dans le circuit de la génératrice présentant une plus faible chute de tension (cette résistance aura pour effet de réduire le rendement de l'installation).

Des moyens vraiment efficaces à obtenir une répartition uniforme des charges sont le réglage de l'entrefer entre les induits et les pôles principaux des génératrices et l'emploi d'un enroulement équipotentiel.

7-2. Dans les machines à double collecteur, la répartition des charges varie sans causes apparentes au cours de fonctionnement; bien souvent, le nettoyage de l'un des collecteurs modifie la répartition des charges.

Valeurs inégales de la résistance de contact entre les collecteurs et les balais ou dans les contacts du système collecteur de courant.

N'utiliser sur les deux collecteurs que des balais de même marque. Répartir toutes les barres conductrices de manière que leur résistance soit la même dans les circuits des deux collecteurs.

Vérifier tous les contacts dans le système d'amenée de courant et dans le système collecteur de courant (voir § 1-1, J). Nettoyer simultanément les deux collecteurs.

Dans certains cas, pour obtenir une répartition régulière des charges, on insère dans le circuit de

l'un des collecteurs une résistance réglable de faible valeur ce qui n'est pas désirable en raison d'une augmentation des pertes qui en résulte.

Une différence non supérieure à 10 % entre les courants des deux collecteurs est considérée comme admissible.

7-3. Lors de la marche en parallèle de plusieurs génératrices à excitation composée, on constate de fortes variations de la charge de certaines génératrices; il arrive fréquemment que la polarité de l'une des génératrices se trouve

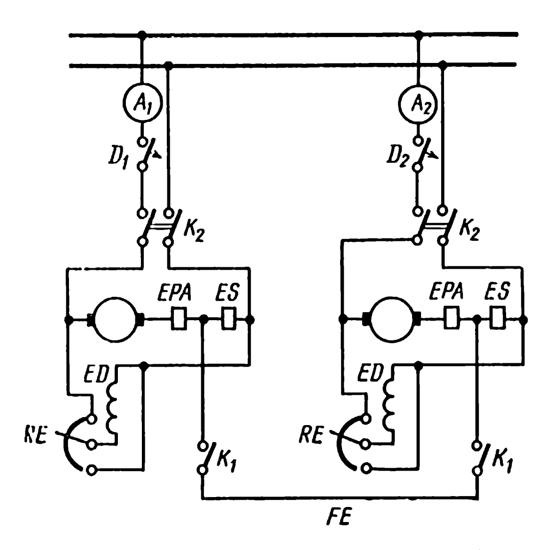


Fig. 1. Schéma de couplage en parallèle des génératrices à excitation composée avec fil d'équilibre:

A_1, A_2: ampèremètres; K_1, K_2: interrupteurs; *RE*: régulateur (rhéostat) d'excitation; D_1, D_2: disjoncteurs; *EPA*: enroulement de pôles auxilaires; *ED*: enroulement d'excitation dérivation; *ES*: enroulement d'excitations série; *FE*: fil d'équilibre

inversée et on voit apparaître de forts crachements au collecteur (voir aussi § 8-2).

Absence de fil d'équilibre entre les enroulements série des génératrices. La stabilité de la marche en parallèle des génératrices à excitation composée est impossible à réaliser.

Poser un fil d'équilibre de section suffisante (fig. 1). Pour que le fonctionnement des génératrices couplées en parallèle soit stable, la résistance de ce

fil d'équilibre doit être inférieure à la somme des résistances des enroulements série des deux génératrices; il sera encore mieux si sa résistance est inférieure à la résistance de l'enroulement série de chaque génératrice. Si cette condition n'est pas réalisée, la marche en parallèle des génératrices ne sera pas stable, même si l'on utilise un fil d'équilibre et les génératrices risqueront de l'amorcer avec une polarité inverse de celle que l'on désire.

Les connexions doivent être faites conformément au schéma de la fig. 1. Les ampèremètres A_1 et A_2 et les disjoncteurs D_1 et D_2 (s'ils sont utilisés) doivent être branchés comme il est montré sur la figure. Quand ces appareils sont branchés dans le même conducteur avec l'enroulement série, il est impossible de déterminer une répartition irrégulière de la charge entre les génératrices parce que le fil d'équilibre pourra être parcouru par des courants d'échange; en outre, si l'un des disjoncteurs vient à se déclencher, la génératrice correspondante continuera à fonctionner mais en moteur.

Pour le couplage en parallèle des génératrices on ferme d'abord les interrupteurs K_1 et ensuite les interrupteurs K_2; pour le découplage les opérations sont inverses de celles de couplage : on ouvre tout d'abord les interrupteurs K_2 et ensuite les interrupteurs K_1.

Pour éviter à l'opérateur toute erreur de manœuvre lors du couplage et du découplage des génératrices, on peut remplacer les interrupteurs unipolaires K_1 et les interrupteurs bipolaires K_2 par des interrupteurs tripolaires.

En outre, on peut prévoir une petite résistance en la plaçant en dérivation sur l'enroulement série de la génératrice qui prend la plus grande charge et en affaiblissant légèrement par-là l'action due à cet enroulement.

7-4. La charge de la génératrice oscille, aucun autre défaut de fonctionnement n'est constaté.

A. *Si les oscillations de la charge sont indépendantes des récepteurs, elles sont imputables à un défaut de fonctionnement du moteur d'entraînement ou à un patinage non uniforme de la courroie d'entraînement.* Quand la machine motrice

est constituée par un moteur asynchrone, un défaut dans le rotor de ce dernier peut provoquer des oscillations de la charge (voir § 16-9).

Remédier au défaut du moteur d'entraînement ou supprimer le patinage irrégulier de la courroie.

B. *Mauvais contact au circuit d'excitation de la génératrice.*

Vérifier le circuit d'excitation de la génératrice (voir annexe 8).

§ 8. Désaimantation spontanée et renversement d'aimantation d'une génératrice

8-1. La génératrice dérivation ne s'amorce plus ou la polarité des balais est inversée.

La génératrice est désaimantée ou aimantée en sens inverse (*renversement d'aimantation*). Ce phénomène peut s'observer dans le cas où les balais sont décalés de la ligne neutre dans le sens de rotation de la machine et, de ce fait, l'enroulement d'induit produit des ampères-tours qui créent un flux affaiblissant le flux principal développé par l'enroulement dérivation. Si le circuit extérieur de la machine est doué d'une forte auto-induction (c'est le cas par exemple des machines servant à l'excitation des alternateurs synchrones) il peut arriver, en cas d'une diminution rapide du courant dans l'enroulement d'excitation dérivation par suite d'un déplacement trop rapide de la manette du régulateur de champ dans le sens d'augmentation de la résistance ou à cause d'un mauvais contact au circuit de l'enroulement dérivation, que le courant dans l'induit décroisse plus lentement que le courant d'excitation. Comme conséquence, les ampères-tours résultants pourront changer de signe de sorte que la machine sera soit désaimantée soit aimantée dans le sens opposé (aura sa polarité inversée). Dans le dernier cas, la polarité des balais de la machine sera inversée.

L'emploi de pôles auxiliaires a pour effet d'accentuer l'affaiblissement du flux utile de la machine lorsque les balais sont décalés de la ligne neutre dans le sens de rotation.

Dans le cas des génératrices seules, la désaimantation et le renversement d'aimantation provoquent soit la perte de tension, soit l'inversion de polarité des balais sans qu'on constate des symptômes extérieurs particuliers. Dans les génératrices couplées en parallèle, la désaimantation et

l'inversion de polarité s'accompagnent de fortes étincelles aux balais qui se transforment dans certains cas en coups de feu circulaire (voir § 1-16).

Le renversement d'aimantation des excitatrices des alternateurs synchrones qui se produit en cas d'une variation rapide du courant dans l'enroulement dérivation de l'excitatrice peut être aisément expliqué par l'action de l'énergie magnétique du rotor, en suivant le parcours du courant à l'aide de la fig. 2. Le sens du courant lors du fonctionnement normal, avec la polarité désirée de la génératrice, est indiqué sur la fig. 2, *a*. Lorsque la manette du

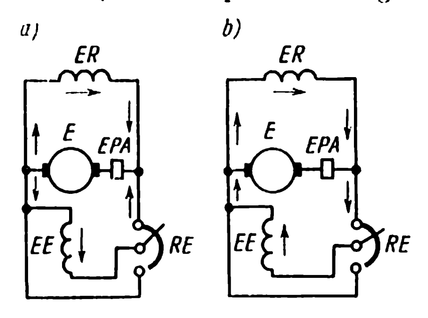


Fig. 2. Renversement d'aimantation d'une excitatrice:
a: sens du courant lors du fonctionnement normal de l'excitatrice;
b: sens du courant en cas de renversement d'aimantation.

E : excitatrice; *ER* : enroulement rotorique de l'alternateur; *EPA* : enroulement des pôles auxiliaires; *EE* : enroulement d'excitation de l'excitatrice; *RE* : régulateur d'excitation

régulateur d'excitation est déplacée trop vivement dans le sens d'augmentation de sa résistance ainsi que dans le cas où le circuit de l'enroulement dérivation se trouve brusquement interrompu et rétabli ensuite en sens opposé (à cause d'un mauvais contact au régulateur par exemple), la tension de l'excitatrice et le courant dans son enroulement dérivation décroissent rapidement et le courant dans le rotor de l'alternateur doit donc diminuer lui aussi. Pourtant, le champ magnétique décroissant de l'alternateur induit dans son enroulement rotorique des extra-courants qui tendent à maintenir inchangée l'intensité du courant dans le rotor de sorte que ce dernier se transforme d'un récepteur de courant en une source de courant. C'est ainsi que le courant dans l'enroulement d'excitation de l'excitatrice peut changer de sens comme il est montré sur la fig. 2, *b*. Par rapport

à l'enroulement dérivation, ce courant circule dans le sens opposé à celui qui correspond au fonctionnement normal de sorte que l'excitatrice change de polarité. Le renversement d'aimantation de l'excitatrice peut être également provoqué par un court-circuit accidentel dans l'alternateur. Dans ce cas, le champ décroissant de l'alternateur sera aussi maintenu par les extra-courants induits dans l'enroulement rotorique qui transforment le rotor en une source de courant tout à fait de la même manière que dans le cas considéré plus haut, et on y obtient la même répartition du courant que celle représentée par la fig. 2, *b*.

Les étincelles anormales aux balais de l'excitatrice peuvent elles aussi provoquer un renversement de son aimantation. Une brusque apparition d'étincelles nourries entre les balais et le collecteur est équivalente à l'introduction d'une forte résistance dans le circuit de l'induit de sorte qu'une fraction du courant rotorique de l'alternateur se dérive vers l'enroulement dérivation de l'excitatrice et provoque le renversement de son aimantation comme il est indiqué sur la fig. 2, *b*.

Assurer l'aimantation de la génératrice depuis une source de courant indépendante, en respectant le sens des polarités (voir annexe 6).

Ramener les balais sur la ligne neutre (voir annexe 4). Dans les cas où la désaimantation se produit pour le calage des balais sur la ligne neutre, décaler les balais de 1 ou 2 lames du collecteur dans le sens opposé à la rotation de la machine à condition qu'un tel décalage ne compromette la bonne commutation et ne produise pas d'étincelles anormales aux balais.

Eviter une augmentation trop brusque de la résistance du régulateur d'excitation, c'est-à-dire un déplacement trop rapide de sa manette lorsque la tension de la génératrice tombe.

S'assurer du bon état de tous les contacts placés dans le circuit de l'enroulement dérivation et du régulateur de tension (voir § 6-2, II).

Bobiner sur les pôles principaux de la génératrice un enroulement série auxiliaire de manière que ses ampères-tours renforcent ceux de l'enroulement dérivation. Placer sur les pôles principaux de la génératrice une spire en court-circuit en cuivre

rouge de section suffisamment grande pour que sa résistance soit aussi faible que possible.

8-2. La génératrice à excitation composée a inversé la polarité des balais.

A. *Absence de fil d'équilibre entre les enroulements série des génératrices couplées en parallèle* (voir § 7-3).

Monter le fil d'équilibre (voir § 7-3). Assurer l'aimantation de la génératrice à partir d'une source indépendante, en respectant le sens des polarités (voir annexe 6).

B. *L'enroulement série de la génératrice a été traversé par un courant de sens opposé (lors de la décharge d'une batterie d'accumulateurs, par exemple).*

Monter dans le circuit d'induit un disjoncteur directionnel. Procéder à l'aimantation de la génératrice.

§ 9. Vitesse de rotation anormale du moteur

9-1. Le moteur ne démarre pas. Le rhéostat de démarrage étant mis en circuit, le courant dans l'induit est absent.

A. *Fusion des fusibles.*

Remplacer les fusibles fondus.

B. *Coupure dans le rhéostat de démarrage ou dans les fils conducteurs.*

Localiser la coupure à l'aide d'une lampe de contrôle ou d'un mégohmmètre et rétablir la continuité du circuit.

C. *Coupure dans l'enroulement d'induit.*

Voir § 1-9.

9-2. Le courant dans l'induit est normal. Le moteur ne démarre pas en charge. Le moteur lancé à la main, prend en marche à vide une vitesse exagérée et peut s'emballer.

A. *Affaiblissement ou absence de champ.*

Voir § 6-2, H.

B. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre spires dans une ou plusieurs bobines de l'enroulement dérivation.*

Voir § 1-6, B.

C. Voir § 6-4, D.

D. *L'enroulement d'excitation dérivation est mis à la masse ou se trouve en contact avec d'autres enroulements, ce qui provoque son shuntage partiel ou total.*

Voir § 5-3, B.

E. *Par suite d'une erreur de couplage de l'enroulement d'excitation dérivation au moteur et au rhéostat de démarrage le circuit d'excitation se trouve branché sur la ligne d'une même polarité* (fig. 3).

Brancher correctement l'enroulement d'excitation dérivation comme il est indiqué sur la fig. 5.

9-3. Le moteur démarre à vide, mais ne démarre pas en charge. Lorsque le balai du rhéostat de démarrage est amené sur le dernier plot (position de travail), le moteur fonctionne normalement.

L'enroulement d'excitation dérivation est incorrectement branché—après le rhéostat de démarrage (fig. 4). Il en résulte

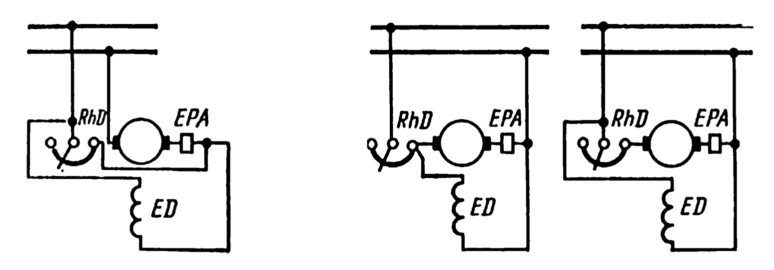


Fig. 3. Branchement incorrect de l'enroulement d'excitation dérivation au moteur et au rhéostat de démarrage:

RhD: rhéostat de démarrage; *EPA*: enroulement des pôles auxiliaires; *ED*: enroulement d'excitation dérivation

Fig. 4. Branchement incorrect de l'enroulement d'excitation dérivation d'un moteur à courant continu.

Mêmes symboles que pour la fig. 3

Fig. 5. Branchement correct de l'enroulement d'excitation dérivation d'un moteur à courant continu.

Mêmes symboles que pour la fig. 3

qu'au démarrage l'intensité du courant dans l'enroulement d'excitation dérivation est trop faible, les inducteurs ne sont pas suffisamment excités et le moteur ne peut pas développer un couple de démarrage exigé. Au fur et à mesure que la résistance du rhéostat de démarrage diminue, le courant traversant l'enroulement d'excitation dérivation augmente et lorsque le balai du rhéostat est positionné sur le dernier plot, le fonctionnement du moteur devient normal.

En cas d'emploi d'un rhéostat de démarrage à deux bornes, brancher l'enroulement d'excitation dérivation conformément au schéma de la fig. 5.

9-4. Le courant dans l'induit et dans l'enroulement d'excitation dérivation existe. Le moteur ne démarre pas ou tourne trop lentement. Les balais crachent.

A. *Coupure ou mauvais contact dans l'enroulement d'induit.*

Voir §§ 1-8, A et 1-9.

B. *Défaut d'isolement ou court-circuit dans l'induit.*

Voir § 1-2, A, B et annexe 8.

9-5. A tension d'alimentation nominale, la vitesse de rotation du moteur est supérieure à sa valeur normale. En outre, le moteur à excitation composée développe un couple de démarrage trop réduit.

A. *Décalage des balais de la ligne neutre dans le sens opposé à la rotation du moteur.*

Remettre les balais sur la ligne neutre (voir annexe 4).

B. *Le régulateur d'excitation est trop résistant.*

Diminuer la résistance du régulateur d'excitation et, s'il y a lieu, le mettre complètement hors circuit.

C. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre spires dans une ou plusieurs bobines inductrices en dérivation.*

Voir § 1-6, B.

D. *Dans le moteur à excitation composée, l'enroulement série est couplé à flux soustractif avec l'enroulement dérivation.*

Voir § 6-5, C.

9-6. A tension d'alimentation nominale, la vitesse de rotation du moteur est inférieure à sa valeur normale.

A. *Les balais sont décalés de la ligne neutre dans le sens de rotation du moteur.*

Remettre les balais sur la ligne neutre (voir annexe 4).

B. *La résistance du régulateur d'excitation est trop faible.*

Augmenter la résistance du régulateur d'excitation.

C. Voir § 6-7, C.

9-7. Le moteur pompe. Le moteur démarre facilement et fonctionne normalement à charge réduite, mais lorsque sa charge augmente et que le champ est affaibli (pour le réglage de la vitesse de rotation) il commence à pomper, c'est-à-dire à produire de fortes oscillations du courant et de la vitesse. Si le moteur n'est pas arrêté à temps, il peut s'emballer de sorte que l'intensité du courant peut prendre une valeur dangereuse pour la machine.

A. *Le moteur fonctionne avec un champ très faible (exemple : un moteur à vitesse réglable). Lorsque la charge augmente, la réaction magnétique de l'induit fait croître sa vitesse de rotation.*

Dans la plupart des cas, le pompage du moteur peut être supprimé en décalant les balais de la ligne neutre dans le sens de rotation. Si les conditions de bonne commutation ne permettent pas de décaler les balais jusqu'à une position assurant un fonctionnement stable, on peut, pour supprimer à coup sûr le pompage du moteur, bobiner sur les pôles principaux un enroulement série auxiliaire à petit nombre de spires en vue de renforcer le champ. Le plus souvent, il s'avère suffisant d'enrouler 2 ou 3 spires (dans les grosses machines une seule spire).

Dans le cas où les moteurs à excitation composée sont utilisés pour la marche à deux sens de rotation, il est nécessaire de procéder, simultanément avec l'inversion du sens de marche, à la commutation de l'enroulement série (voir annexe 1).

B. *Les balais sont décalés de la ligne neutre dans le sens opposé à la rotation du moteur ou ne portent sur le collecteur que par leur bord d'entrée.*

Voir § 9-7, A, § 1-1, C.

C. *L'enroulement série et l'enroulement dérivation sont couplés à flux soustractif.*

Voir § 6-5, C.

Chapitre 2

DÉFAUTS DES MOTEURS ASYNCHRONES

§ 10. Crachement aux balais et grillage des bagues collectrices

Le moteur crache; certains balais et leurs accessoires s'échauffent anormalement et grillent.

A. *Mauvais rodage des balais.*

Roder les balais sur les bagues collectrices au moyen du papier de verre. Il n'est pas recommandé d'utiliser pour le rodage la toile d'émeri (voir annexe 4).

B. *Les balais ne peuvent pas se déplacer librement dans leurs cages ce qui compromet le contact entre les bagues collectrices et les balais.*

Monter des balais ayant une dimension telle qu'ils puissent se déplacer librement et ne soient pas coincés dans les gaines; au besoin, fraiser et roder les balais. Le jeu normal entre le balai et sa cage est compris entre 0,2 et 0,3 mm.

C. *Encrassement des bagues collectrices et des balais.* L'encrassement est dans certains cas provoqué par la pénétration de l'huile à partir du palier.

Nettoyer les bagues collectrices de la boue et des poussières et les essuyer avec un chiffon de toile propre non pelucheux, légèrement imbibé d'essence. Supprimer les causes de pénétration d'huile à partir du palier (voir § 42-2, 42-3, 43-2).

D. *Les bagues collectrices ont une surface non lisse ou ne tournent pas rond.*

Rectifier ou tourner les bagues collectrices (voir annexe 4).

E. *La pression des balais sur les bagues collectrices est trop faible.*

Régler la pression des balais conformément aux normes prescrites par le constructeur (voir annexe 4).

F. *Balais de qualité non appropriée.*

Utiliser des balais préconisés par le constructeur ou des balais de qualité appropriée (voir annexe 5).

G. *La densité de courant est répartie de façon non uniforme entre les balais.* Ce phénomène peut se présenter à cause du mauvais contact dans le circuit des porte-balais et des connexions ainsi qu'à cause d'une pression non uniforme des balais sur les bagues collectrices et d'emploi de balais de qualités différentes.

Vérifier et réparer tous les contacts dans la couronne porte-balais, les conducteurs d'amenée de courant, les porte-balais et les balais. Régler à une même valeur convenable la pression des balais sur les bagues collectrices conformément à la qualité des balais utilisés (voir annexe 5). N'utiliser que les balais de la même qualité. Dans le cas où il est impossible d'employer les mêmes balais pour toute la machine, répartir les balais disponibles de manière que chaque bague collectrice ne comporte que des balais de même qualité (voir annexe 4).

§ 11. Echauffement anormal de la machine

Voir § 2.

§ 12. Echauffement anormal du fer actif statorique

12-1. Le fer actif du stator s'échauffe uniformément bien que la charge du moteur ne dépasse pas sa valeur nominale.

La tension d'alimentation est supérieure à sa valeur nominale.

Réduire la tension d'alimentation jusqu'à sa valeur nominale. Si cela est impossible à réaliser, renforcer la ventilation du moteur et contacter le représentant du constructeur sur les procédés permettant de renforcer la ventilation. Dans le cas où l'échauffement du fer statorique reste quand même exagéré après le renforcement de la ventilation et

il y a un risque de fonctionnement défectueux du moteur, remplacer ce dernier par un autre correspondant à la tension du réseau disponible. Voir aussi § 13-1, C.

12-2. On constate un échauffement exagéré local du fer statorique lors de la marche à vide du moteur pour une tension nominale du réseau.

A. *Il y a des courts-circuits locaux entre certaines tôles du fer statorique provoqués par des bavures qui se sont produites lors du limage ou à cause du frottement rotor-stator survenant pendant le fonctionnement du moteur.*

Enlever les bavures; passer à une lime bien aiguillée les endroits de court-circuit ; désunir les tôles en court-circuit et les enduire d'une couche de vernis isolant séchant à l'air libre (voir aussi § 12-2, C).

B. *Défaut d'isolement ou court-circuit entre les boulons de serrage et les tôles magnétiques (dans les machines de construction ancienne).*

Réparer l'isolement des boulons de serrage ou remplacer les boulons défectueux par des boulons neufs; dans la plupart des cas cette opération exige qu'on procède à un rebobinage partiel ou complet de l'enroulement statorique.

C. *Les dents du fer actif sont brûlées dans certains endroits et sont soudées par suite des courts-circuits dans l'enroulement statorique ou de la mise à la masse de cet enroulement.*

Découper les endroits défectueux. Interposer entre les tôles magnétiques défectueuses une mince couche de carton ou de mica et les enduire avec du vernis isolant. Un tel procédé de dépannage donne de bons résultats à condition d'isoler soigneusement les tôles magnétiques l'une de l'autre, afin de prévenir la formation de courts-circuits nouveaux. En cas d'un grand nombre de tôles avariées, procéder à un nouveau empilage du fer statorique, ce qui comporte un rebobinage de l'enroulement du stator. Avant de remettre en place l'enroulement statorique, il est nécessaire de faire subir au fer actif un essai en vue de s'assurer que les tôles ne sont pas en court-circuit. Cet essai est effectué à l'aide d'un enroulement magnétisant alimenté par un courant monophasé pour une induction magnétique dans

le fer égale à 1 T (voir section G de l'annexe 10). L'absence d'échauffements locaux dans le fer témoignera d'une qualité satisfaisante de la réparation.

§ 13. Echauffement anormal de l'enroulement statorique

13-1. On constate un échauffement uniforme de tout l'enroulement statorique.

A. *Le moteur est surchargé ou sa ventilation est défectueuse.*

Voir § 2.

B. *La tension aux bornes du moteur est inférieure à sa valeur nominale de sorte que pour une puissance nominale le moteur se trouve surchargé en courant.*

Elever la tension jusqu'à sa valeur nominale ou réduire la charge jusqu'à la valeur nominale du courant.

C. *L'enroulement statorique est couplé en triangle alors qu'il devrait l'être en étoile.*

Coupler l'enroulement statorique en étoile.

13-2. L'enroulement statorique s'échauffe exagérément par endroits. L'intensité du courant dans les phases n'est pas la même. Le moteur grogne fortement et ne développe pas son couple moteur normal.

A. *Court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique.*

Voir annexe 8, B.

B. *Erreur de couplage des bobines d'une phase*; *inversion de l'une ou plusieurs bobines.*

Voir § 16-12, A.

C. *Mise à la masse en deux endroits de l'enroulement d'une phase.*

Localiser, à l'aide d'un mégohmmètre ou d'une lampe témoin, l'endroit de mise à la masse de l'enroulement (voir annexe 8) et l'éliminer; rebobiner, au besoin, les bobines défectueuses.

D. *Court-circuit entre deux phases.*

Rechercher l'endroit du court-circuit (voir annexe 8). Réparer ou rebobiner la partie défectueuse de la bobine.

§ 14. Echauffement anormal de l'enroulement rotorique

14-1. Tout l'enroulement rotorique s'échauffe uniformément. Le moteur tourne trop lentement. On ne constate aucun autre défaut de fonctionnement.

Voir § 2 et § 13-1, B.

14-2. Le rotor et parfois le stator s'échauffent anormalement. Le moteur « grogne » , le courant dans l'enroulement statorique est fortement variable. Le moteur démarre difficilement en charge et ne prend pas sa vitesse de rotation normale; le couple moteur est inférieur à sa valeur nominale.

Le défaut est dû à un mauvais contact dans le circuit du rotor. Dans un moteur à rotor bobiné peuvent se présenter des cas A à E :

A. *Mauvais contact aux soudures des parties frontales de l'enroulement ou au point neutre, aux connexions entre les tiges ou aux connexions entre les groupes parallèles.*

Vérifier avec soin toutes les soudures dans l'enroulement du rotor; refaire celles des soudures qui sont en mauvais état ou élèvent un doute. Si l'examen superficiel ne permet pas de déceler les mauvaises soudures et les défauts indiqués au § 14-2, B à E ne sont pas constatés, procéder à la vérification des soudures dans l'enroulement rotorique par la méthode de la chute de tension (voir annexe 8).

B. *Mauvais contact aux connexions entre l'enroulement et les bagues collectrices.*

Vérifier les contacts des conducteurs aux endroits de leur raccordement à l'enroulement et aux bagues collectrices.

C. *Mauvais contact aux balais ou contact affaibli du mécanisme de court-circuitage du rotor et de relevage des balais dû à une défectuosité mécanique, à un encrassement ou à une pénétration d'huile.*

Voir §10, A à E.

D. *Mauvais contact aux endroits de connexion entre les bagues collectrices et le rhéostat de démarrage.*

Vérifier le bon état des contacts aux endroits de raccordement des fils aux sorties du rotor et du rhéostat de démarrage.

E. *Mauvais contact dans le rhéostat de démarrage provoqué, par exemple, par une mauvaise portée des balais.*

Vérifier et nettoyer les contacts et les balais du rhéostat de démarrage.

F. *Mauvais contact entre les tiges du rotor en court-circuit et les couronnes de court-circuit à cause du détachement des tiges ou d'une rupture des couronnes* (*en un seul ou plusieurs endroits*). Dans certains cas, on peut observer la rupture des tiges dans les encoches du rotor.

Localiser la rupture (voir annexe 8), ressouder ou remplacer la tige rompue du rotor.

14-3. Le moteur à rotor bobiné démarre à vide, le circuit rotorique étant ouvert. Lors du démarrage en charge, le moteur prend trop lentement sa vitesse et son rotor s'échauffe anormalement.

Court-circuit entre les collerettes consécutives dans les têtes de bobine ou dans l'enroulement du rotor; mise à la masse en deux endroits de l'enroulement rotorique.

Vérifier avec soin si les collerettes voisines des têtes de bobine ne sont pas en contact ; en cas de court-circuit, les déplier. S'assurer que les collerettes ne sont pas mises en court-circuit par des coulées d'étain laissées après la soudure; si c'est le cas, enlever les coulées. Mesurer la résistance d'isolement du rotor et en cas de mise à la masse de l'enroulement rotorique ou des bagues collectrices, supprimer le défaut. Pour les procédés à employer en vue de localiser un court-circuit, voir annexe 8.

Après avoir détecté la partie court-circuitée de l'enroulement, remplacer ou rebobiner les bobines (ou les sections) défectueuses. Ne pas se contenter d'une remise en état d'un isolement local, étant donné que l'échauffement anormal aboutit le plus souvent à la détérioration de l'isolation de toutes les bobines en court-circuit ce qui risque de produire de nouveaux courts-circuits.

§ 15. Echauffement anormal des bagues collectrices et des balais

15-1. Les bagues collectrices et les balais s'échauffent anormalement.

A. *Fortes étincelles aux balais.*

Voir § 10.

B. *Pression exagérée des balais sur les bagues collectrices.*

Régler la pression des balais conformément à leur qualité (voir annexe 5).

C. *Ventilation insuffisante des bagues collectrices et des balais* (dans le cas des moteurs à bagues fermées). L'échauffement s'accompagne généralement d'un crachement aux balais et d'une usure accélérée des balais et des bagues.

Renforcer la ventilation des bagues collectrices et des balais par installation d'un ventilateur ou en augmentant la quantité ou les dimensions des ailettes de ventilation; augmenter le nombre et les dimensions des canaux de ventilation dans le coffret. Contacter le représentant du constructeur pour les recommandations.

Dans certains cas, il est utile de pratiquer sur la surface frottante des balais quelques gorges longitudinales et transversales profondes de 3 mm et larges de 1 mm comme il est indiqué sur la fig. 2 de l'annexe 7. Le nombre de telles découpures doit correspondre aux dimensions des balais. La fonction de ces découpures consiste à renforcer la ventilation et le refroidissement des balais ainsi qu'à évacuer des gaz à partir de la surface frottante des balais.

Parfois, il y a intérêt à pratiquer sur les balais des gorges hélicoïdales (voir annexe 4).

§ 16. Vitesse de rotation anormale du moteur

16-1. Le moteur ne démarre pas.

Le courant dans le stator est inexistant à cause de la fusion des coupe-circuits ou du déclenchement d'un disjoncteur défectueux.

Monter des fusibles neufs ; dépanner le disjoncteur.

16-2. Le moteur ne démarre pas; étant lancé à la main, il fonctionne par à-coups et produit un ronflement anormal; l'une des phases du stator n'est pas alimentée.

Coupure dans l'une des phases du réseau ou coupure interne dans l'enroulement statorique couplé en étoile (les phénomènes qui se déroulent dans le moteur en cas de coupure interne dans l'enroulement statorique couplé en triangle sont décrits au § 16-11).

Si la coupure d'une phase se produit au cours du fonctionnement du moteur, ce dernier peut continuer à tourner avec le couple moteur nominal mais sa vitesse diminue fortement

et l'intensité du courant augemente d'une manière telle qu'en l'absence de protection à maximum de courant l'enroulement statorique ou rotorique risque de se brûler.

Vérifier au voltmètre la tension entre les bornes du stator. Si l'une des phases du réseau présente une coupure ou si la tension dans toutes les trois phases n'est pas symétrique (par exemple, en cas de fusion du coupe-circuit ou de coupure dans l'une des phases au primaire du transformateur) supprimer le défaut du réseau. Si ce dernier est en bon état, on est en présence d'une coupure dans l'enroulement statorique (pour localisation d'une coupure dans l'enroulement, voir annexe 8).

16-3. Le moteur ne démarre pas bien que la tension aux bornes du stator soit nominale, et que l'intensité du courant dans toutes les trois phases du stator soit la même, toutes les trois tensions mesurées sur les bagues, pour un rotor à l'arrêt en circuit ouvert, soient égales (dans un moteur diphasé, les tensions entre les bagues médiane et extrême sont égales entre elles alors que la tension entre les bagues extrêmes est égale à 1,4 fois celle entre les deux premières).

A. *Coupure dans deux (ou trois) phases du rhéostat de démarrage ou dans les conducteurs reliant le rotor au rhéostat de démarrage.*

Localiser à l'aide d'un mégohmmètre ou d'une lampe de contrôle l'endroit de coupure et réparer (voir annexe 8).

B. *Une forte attraction unilatérale du rotor par le stator à cause d'une usure excessive des coussinets de palier ou du déplacement des flasques ou des bâtis de paliers.*

16-4. Le moteur branché sur le réseau d'alimentation ne tourne pas: il « colle» ; étant retiré de cet état, il prend de la vitesse et continue à fonctionner normalement. Un tel phénomène se présente plus spécialement avec les moteurs à cage d'écureuil.

Le choix du rapport du nombre d'encoches du stator et du rotor est défavorable. Le collage se manifeste le plus fortement lorsque le nombre d'encoches du stator est égal au nombre d'encoches du rotor. Le rapport défavorable du nombre de dents provoque une brusque réduction du couple initial du moteur. Voir la note pour le § 16-7.

Monter un rotor ayant un autre nombre d'encoches.

Pour éviter le phénomène de collage et le phénomène de rampage (voir § 16-7), les constructeurs emploient l'inclinaison des encoches du rotor par rapport aux encoches du stator, c'est-à-dire disposent les encoches du rotor sous un petit angle par rapport à l'axe de l'arbre [26].

16-5. Le moteur à rotor bobiné démarre lorsque le circuit rotorique est ouvert.

Court-circuit dans le rotor.

Voir § 14-3.

Il convient de remarquer que parfois le moteur se met à tourner bien que son enroulement rotorique soit en bon état. La mise en marche du moteur s'explique dans ce cas par l'action du couple moteur développé par l'hystérésis et les courants de Foucault ainsi que par la présence de larges bandages sur le rotor. Le couple moteur de la machine est dans ce cas très faible. Dans de tels cas, aucun remède ne s'impose puisque le moteur est en bon état de marche.

16-6. Le moteur à cage d'écureuil démarre facilement à vide mais ne démarre pas en charge.

Charge au démarrage trop élevée.

Réduire la charge au démarrage.

16-7. Le moteur à cage ne prend pas sa vitesse de rotation normale, mais présente un phénomène dit de « rampage » et commence à fonctionner d'une manière stable à une vitesse réduite qui est plusieurs fois inférieure à la vitesse nominale (est égale à 1/7, 1/11, 1/13, etc. de la vitesse nominale; les dénominateurs de ces fractions sont des nombres impairs non divisibles par 3). Le rampage se présente le plus souvent pour une vitesse égale à 1/7 de la vitesse nominale. Pourtant, dans le cas où le rotor est forcé à tourner à une vitesse supérieure à cette valeur, il s'accélère et prend sa vitesse nominale pour continuer à fonctionner normalement.

La forme de la courbe traduisant la répartition de l'induction magnétique dans l'entrefer s'écarte d'une sinusoïde. La cause principale de ces écarts est un rapport défavorable du nombre d'encoches du stator et du rotor pour un nombre donné de pôles de la machine. Dans ce cas, la courbe d'induction magnétique comporte des harmoniques supérieurs de l'induction magnétique de l'ordre 5, 7, 11, 13, etc. (une courbe non sinusoïdale peut être représentée par la somme d'une sinusoïde fondamentale ou, comme on l'appelle, l'harmoni-

que de premier rang, et des sinusoïdes d'ordre supérieur dont les fréquences sont 5, 7, 11, etc. fois supérieures à la fréquence fondamentale). Ces harmoniques créent des champs qui tournent dans l'espace à une vitesse qui est 5, 7, 11, etc. fois inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique produit par l'harmonique fondamental. Les couples moteurs développés par les harmoniques supérieurs apportent des distorsions dans la courbe du couple moteur résultant et peuvent exercer un effet de freinage sur le moteur pendant son démarrage.

La fig. 6 montre la courbe *1* qui traduit la variation du couple moteur en présence d'un harmonique de rang 7 de

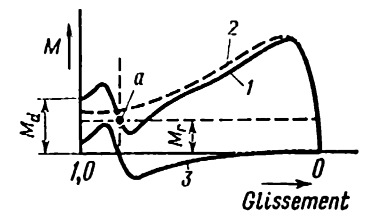


Fig. 6. Courbe de variation du couple M d'un moteur asynchrone en fonction du glissement en présence d'harmoniques supérieurs

l'induction magnétique. On voit que cette courbe comporte un creux. Si la valeur de ce creux est suffisamment grande, de manière que le couple de démarrage M_d développé par le moteur se trouve insuffisant pour surmonter le couple résistant M_r le moteur atteint le point *a* et commence à fonctionner d'une façon stable, à une vistesse qui est approximativement égale à 1/7 de la valeur nominale.

La courbe *2* de la fig. 6 correspond au couple moteur normal lorsque la courbe d'induction magnétique ne comporte pas d'harmoniques supérieurs.

Remplacer le rotor par un autre ou supprimer l'harmonique de rang 7 de l'induction en rebobinant l'enroulement statorique, en employant à cette fin un bobinage à deux couches à pas raccourci (de l'ordre de 6/7). La courbe *3* correspond au couple moteur dû au septième harmonique de l'induction. [1])

[1]) Il convient de remarquer que les constructeurs prennent des mesures en vue d'empêcher les phénomènes de collage et de rampage (voir § 16-4) ainsi que des bruits anormaux (voir § 18-3). C'est pourquoi dans les machines industrielles ces phénomènes ne se présentent que très rarement. On les rencontre surtout dans les cas où la machine a été rebobinée pour un nombre de pôles différent de celui pour lequel

16-8. A charge nominale, le moteur tourne avec une vitesse inférieure à la valeur nominale.

A. *Tension d'alimentation réduite.*

Elever la tension jusqu'à la valeur nominale ou, si cela est impossible, réduire la charge pour éviter un échauffement anormal du moteur.

B. *Mauvais contact dans le circuit du rotor.*

Voir § 14-2.

C. *Résistance trop élevée dans le circuit du rotor* (les conducteurs entre le rotor et le rhéostat de démarrage sont trop longs ou de section insuffisante, le rhéostat n'est pas éliminé du circuit ou est en mauvais état, etc.).

Augmenter la section des conducteurs; réparer le rhéostat: placer le rhéostat de démarrage plus près du moteur.

D. *L'enroulement du stator est couplé en étoile alors qu'il devrait l'être en triangle.*

Coupler en triangle l'enroulement statorique.

16-9. La vitesse de rotation du rotor est inférieure à la valeur nominale et oscille fortement même avec une faible charge; le courant dans le stator présente de fortes pulsations.

Mauvais contact dans le circuit rotorique.

Voir § 14-2.

16-10. Le moteur fonctionne d'une façon stable à la demi-vitesse nominale et grogne fortement surtout pendant le démarrage. Etant lancé jusqu'à la vitesse nominale, le moteur continue à fonctionner normalement mais, lorsque la charge augmente, la vitesse du moteur tombe de nouveau jusqu'à la moitié de sa valeur nominale.

Coupure dans une phase du rotor. La coupure peut se présenter dans l'enroulement du rotor, dans les balais, dans le rhéostat de démarrage ou dans les raccordements entre le rotor et le rhéostat de démarrage.

Localiser, avec un mégohmmètre ou une lampe de contrôle, l'endroit de coupure et rétablir la continuité du circuit (voir annexe 8).

16-11. Le moteur démarre facilement et fonctionne normalement à charge nominale mais l'intensité du courant dans les phases n'est pas identique (dans l'une des phases elle est de 73 % plus élevée que dans les deux autres) et la

---

elle a été construite, sans respecter le rapport entre le nombre d'encoches du stator et celui du rotor, nécessaire pour le nouveau nombre de pôles ou en remplaçant le rotor par un autre pris à une autre machine.

vitesse de rotation du rotor est inférieure à la valeur nominale. L'enroulement d'une phase du stator reste froid.

Coupure interne dans l'une des phases de l'enroulement statorique s'il s'agit des phases couplées en triangle. Il en résulte un triangle ouvert de sorte que le moteur démarre facilement. Mais étant donné que seules deux phases fonctionnent, la puissance du moteur se trouve réduite de 1/3. L'échauffement du moteur dépend, dans ce cas, de la charge et peut rester dans les limites admissibles (pour les phénomènes qui se produisent dans le moteur en cas de coupure dans l'enroulement statorique couplé en étoile, voir § 16-2).

Localiser la coupure (voir annexe 8) ; si elle est à l'intérieur de la bobine, remplacer ou rebobiner cette dernière.

16-12. Le moteur démarre difficilement et grogne fortement ; l'intensité du courant est différente dans toutes les trois phases et, en marche à vide, dépasse la valeur nominale.

A. *L'une des phases de l'enroulement statorique est inversée* (fig. 7 et 8). Ce phénomène se produit plus spécialement

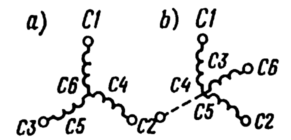


Fig. 7. Couplage en étoile correct (*a*) et incorrect (*b*) des phases

Fig. 8. Couplage en triangle correct (*a*) et incorrect (*b*) des phases

avec des moteurs comportant six sorties de l'enroulement. Sa cause est le mauvais couplage entre les sorties sur la plaque de bornes ou un repérage incorrect des bornes.

Refaire les connexions des sorties sur la plaque à bornes conformément au schéma des couplages accompagnant le moteur ou, si ce schéma n'est pas disponible, d'après les symboles littéraux des sorties de l'enroulement, en procédant d'après le schéma des couplages normaux indiqués dans l'annexe 1.

Si les symboles littéraux sont absents et il s'avère impossible de vérifier le schéma des connexions de l'enroulement, rechercher le couplage correct des

connexions de sortie de l'enroulement comme il est indiqué dans l'annexe 2.

B. *Couplage incorrect de l'interrupteur au moteur.* Ce cas peut se présenter avec les moteurs à cage d'écureuil dont le démarrage s'effectue par le passage de l'étoile au triangle à l'aide d'un inverseur spécial.

Vérifier et rétablir le couplage correct de l'inverseur au moteur.

§ 17. Attraction unilatérale du rotor

Pendant la marche le rotor heurte le stator.

A. *Inégalité de longueur de l'entrefer entre le stator et le rotor provoquée par: une usure excessive des coussinets de paliers, un déplacement des flasques de paliers, une installation incorrecte des bâtis de paliers, une déformation du fer statorique ou rotorique, un gauchissement de l'arbre.*

Vérifier le jeu entre les tourillons et les coussinets (les normes pour ces jeux sont indiquées dans l'annexe 12) et, s'il y a lieu, regarnir les coussinets ou les remplacer; vérifier l'entrefer entre le rotor et le stator (voir annexe 12); en cas d'absence des tiges de centrage dans les flasques de paliers ou dans les bâtis de paliers, les mettre en place; en cas de déformation du fer statorique, le passer à la lime bien aiguillée, en prenant soin d'éviter la formation de bavures (voir aussi § 12-2, A et § 12-2, C); en cas de déformation du fer rotorique, le tourner ou rectifier à la meule; vérifier la rectitude de l'arbre (voir annexe 12).

B. *Rotor mal équilibré.*

Procéder à l'équilibrage du rotor (voir annexe 14).

C. *Défaut d'isolement entre les spires et courts-circuits dans l'enroulement statorique ou erreur de couplage des phases du stator* (voir § 16-12). Il en résulte une asymétrie du flux magnétique de sorte que le rotor subit une attraction unilatérale. Dans ces conditions, le rotor est attiré vers la face du stator opposée à l'endroit de défaut étant donné que, dans ce dernier, le flux magnétique sera affaibli à cause de l'action démagnétisante de la partie court-circuitée de l'enroulement.

Pour la localisation de courts-circuits, voir l'annexe 8 et pour le couplage correct des enroulements, les annexes 1 et 2.

§ 18. Bruit anormal de la machine [1])

18-1. Le moteur ronfle fortement. L'intensité du courant n'est pas la même dans toutes les phases. L'échauffement de l'enroulement statorique n'est pas uniforme.

A. *Court-circuit dans l'enroulement statorique.*

Voir § 1-6, B.

B. *Mauvais couplage de l'enroulement statorique.*

Voir § 16-12.

C. *Nombre de spires inégal dans les bobines de l'enroulement statorique.* On n'observe le ronflement que dans le cas d'emploi d'un enroulement à plusieurs voies couplé en triangle. Lorsque toutes les bobines sont connectées en série et les phases sont couplées en étoile, le nombre inégal de spires dans les bobines ne provoque pas de ronflement, c'est seulement l'intensité du courant qui est différente dans les phases.

Déconnecter toutes les trois phases et les voies d'enroulement l'une de l'autre. Faire passer, à tour de rôle, un courant alternatif dans chaque phase (en cas de connexion de toutes les bobines en série) ou dans chaque dérivation (en cas de connexion en parallèle) et mesurer avec un voltmètre la chute de tension dans les groupes de bobines. Pour les groupes de bobines comportant un plus faible nombre de spires la tension sera plus faible que sur les groupes de bobines en bon état. La différence maximale admissible entre les tensions sur les groupes de bobines ne doit pas dépasser 5 %.

Cet essai peut être effectué aussi bien avec un rotor mis en place qu'avec un rotor sorti. Lorsque le rotor est mis dans le moteur, l'essai peut s'effectuer pour une tension nominale. Avec un rotor sorti ou avec un rotor à cage monté dans le moteur, la tension à appliquer au stator ne doit pas dépasser 15 à 20 % de la tension nominale du moteur.

Le nombre de spires dans les bobines statoriques peut être également vérifié, en alimentant le moteur du côté rotor (pour un moteur à rotor bobiné).

---

[1]) Pour les causes générales du bruit anormal dans les machines, voir § 45.

18-2. Le fonctionnement du moteur est normal mais on entend un ronflement de note basse. L'intensité du courant est la même dans toutes les trois phases.

Les groupes de bobines sont répartis de façon asymétrique dans le cas où l'enroulement statorique comporte plusieurs dérivations (fig. 9, *a*). La répartition asymétrique se manifeste

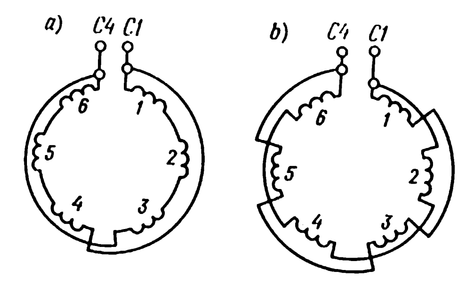


Fig. 9. Répartition asymétrique (*a*) et symétrique (*b*) des groupes de bobines d'une phase de l'enroulement statorique d'un moteur asynchrone triphasé à six pôles en cas de deux branches parallèles

surtout en cas d'un entrefer irrégulier entre le stator et le rotor et peut provoquer dans certains cas une vibration de la machine.

Vérifier avec soin et rétablir l'entrefer régulier entre le rotor et le stator (voir annexe 12).

Assurer le couplage de l'enroulement statorique en se conformant au schéma de la fig. 9, *b* en répartissant les groupes de bobines de chaque dérivation uniformément sur toute la circonférence du stator. Il convient de remarquer que le couplage d'après le schéma de la fig. 9, *b* est difficile à réaliser surtout dans le cas de machines multipolaires à tension élevée, étant donné le croisement des connexions entre les groupes de bobines. C'est la raison pour laquelle les constructeurs réalisent bien souvent les enroulements à dérivations conformément au schéma de la fig. 9, *a*.

Augmenter l'entrefer de 10 à 20 %, en tournant le rotor sur un tour à métaux. Pourtant, on doit avoir en vue qu'un entrefer augmenté compromet le facteur de puissance de la machine.

18-3. **En marche, le moteur produit un fort ronflement de tonalité aiguë (un sifflement) qui disparaît dès que le courant est coupé. Parfois, le ronflement s'accompagne d'une forte vibration.**

Vibration des dents du stator et du rotor par suite d'un choix défavorable du rapport du nombre d'encoches du stator et du rotor [26]. A l'instant où les axes de certaines dents du stator et du rotor s'amènent en coïncidence, il se produit entre elles une attraction unilatérale. Pour illustrer ce phénomène, la fig. 10 représente à un certain instant la disposition

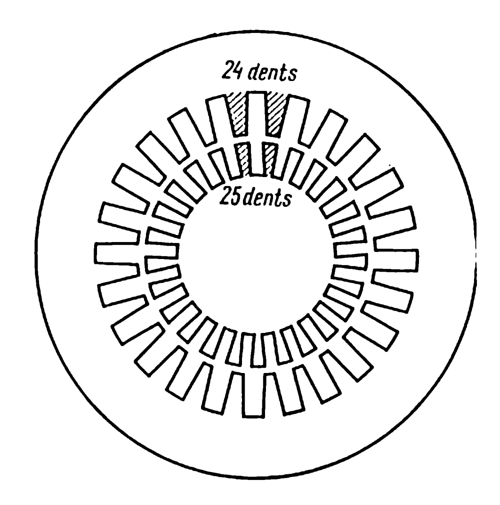


Fig. 10. Disposition mutuelle instantanée des dents statoriques et rotoriques d'un moteur asynchrone

des dents du stator et du rotor pour un moteur qui comporte 24 dents dans le stator et 25 dents dans le rotor (les dents dont les axes sont en coïncidence sont hachurées). Lors de la rotation du rotor, la force d'attraction se déplace à grande vitesse en provoquant la vibration de l'arbre du rotor. Si la rigidité mécanique du stator n'est pas suffisante, ces forces peuvent également provoquer une vibration du stator.

Les vibrations mécaniques qui se produisent dans un milieu élastique, qui est l'air, provoquent un sifflement. L'intensité du sifflement dépend de la valeur de la déformation des organes de la machine, de la fréquence de la force magnétique, des propriétés élastiques du matériau et des propriétés acoustiques de la machine [5].

L'expérience montre que les vibrations les plus fortes et respectivement le bruit (le ronflement) peuvent atteindre

une valeur dangereuse en cas de résonance lorsque la fréquence des oscillations forcées des organes de la machine (du rotor, par exemple) coïncide avec la fréquence des oscillations propres. Dans de tels cas, le fonctionnement du moteur peut s'avérer impossible à cause du frottement rotor-stator.

L'expérience montre également que le ronflement peut se produire aussi dans des moteurs dont les enroulements statoriques sont réalisés avec un nombre fractionnaire d'encoches par pôle et par phase, par exemple pour $q = 2^1/_2$, $3^1/_2$, $4^1/_2$, etc.

En plus des causes de ronflement qui viennent d'être considérées indiquons encore le ronflement (« chant ») des moteurs asynchrones qui est propre à tous les dispositifs électromagnétiques à courant alternatif et qui s'explique par des phénomènes de magnétostriction. Ces phénomènes consistent en changement de forme des corps ferromagnétiques sous l'influence de l'aimantation. Lorsque le rotor tourne, ses dents se déplacent par rapport aux dents du stator, ce qui provoque une pulsation du flux magnétique et celui-ci produit à son tour des variations périodiques brusques de la valeur d'induction magnétique dans les dents du stator et du rotor. La variation périodique du volume des dents qui en résulte constitue la cause du ronflement. Un ronflement anormal provoqué par cette cause s'observe en cas d'une forte saturation magnétique des dents des moteurs.

Pour remédier à ce défaut, il est nécessaire d'installer un nouveau rotor ayant un autre nombre d'encoches. Mais dans le cas où l'on ne cherche qu'à diminuer le ronflement, on peut procéder au tournage du rotor en vue d'augmenter l'entrefer entre le stator et le rotor. Il est recommandé de consulter dans ce cas le représentant du constructeur. Un affaiblissement de bruit peut être également obtenu par la pose de la machine sur une fondation élastique.

Voir aussi la note pour le § 16-7.

§ 19. Recouvrement des bagues collectrices par un arc électrique

Pendant le démarrage du moteur, les bagues collectrices sont recouvertes par un arc électrique. Dans les moteurs à vitesse réglable (c'est-à-dire avec les balais appliqués en

permanence) ce recouvrement peut s'observer parfois aussi pendant la marche du moteur.

A. *Les bagues collectrices et les balais sont encrassés par la poussière de cuivre et de charbon ou par une autre poussière.* En cas d'un entretien mal soigné les conducteurs des balais des phases voisines peuvent se mettre en court-circuit.

Maintenir en bon état de propreté et en bon état de marche les bagues collectrices et les balais. En cas d'encraissement avec de l'huile, éliminer les causes de pénétration de l'huile sur les bagues.

B. *L'air environnant est trop humide ou renferme des vapeurs d'acide et d'alcalis.*

En cas de tensions élevées sur le rotor, assurer une isolation complémentaire de toutes les parties conductrices des balais et de la couronne porte-balais (enrouler avec du ruban, enduire de vernis, etc.) ou remplacer le moteur par un autre correspondant à l'ambiance donnée.

C. *Coupure dans les connexions entre le rotor et le rhéostat de démarrage ou dans le rhéostat lui-même.*

Vérifier la continuité électrique des connexions entre le rotor et le rhéostat de démarrage; s'il y a une coupure ou un mauvais contact dans les connexions, réparer.

L'opinion selon laquelle les recouvrements seraient provoqués par des surtensions qui apparaissent au rotor à l'instant de démarrage du moteur est tout à fait erronée. Si les connexions entre le rotor et le rhéostat de démarrage sont en bon état et constituent un circuit fermé, le rotor ne peut pas devenir le siège des surtensions dangereuses qui peuvent être cause du recouvrement.

Il n'est pas recommandé de mettre sous tension le moteur si le rhéostat de démarrage est ouvert. Lorsque le rhéostat de démarrage comporte un contact d'ouverture, il convient de placer les balais du rhéostat sur le premier plot de travail avant de mettre en marche le moteur et dans le cas d'un rhéostat à liquide il convient d'immerger légèrement les électrodes dans le liquide.

Chapitre 3

DÉFAUTS DES MACHINES SYNCHRONES

§ 20. Défauts de l'excitatrice

Voir chap. 1.

§ 21. Crachement aux balais et grillage des bagues collectrices

Voir § 10 et 15.

§ 22. Echauffement anormal de toute la machine

Voir § 2.

§ 23. Echauffement anormal du fer actif statorique

23-1. Le fer actif du stator s'échauffe uniformément bien que la charge de l'alternateur ne dépasse pas sa valeur normale.

A. *L'alternateur fonctionne sous une tension supérieure à la valeur nominale.* L'élévation de la tension fait croître les pertes dans le fer ce qui provoque son échauffement élevé. En même temps que l'échauffement du fer, on constate évidemment un échauffement anormal de l'enroulement statorique (voir § 24-1) alors que l'augmentation du courant d'excitation provoque un échauffement élevé de l'enroulement d'excitation (voir § 25).

Réduire la tension jusqu'à sa valeur nominale.

B. *L'alternateur tourne à une vitesse inférieure à la valeur nominale à cause du mauvais fonctionnement du moteur d'entraînement (dans le cas d'un alternateur autonome) ou à cause d'une baisse de la fréquence du réseau.*

Réparer le moteur d'entraînement ou prendre des mesures pour rétablir la valeur normale de la fréquence du réseau.

23-2. Le fer actif s'échauffe anormalement par endroits en marche à vide de l'alternateur sous la tension nominale.

Voir § 12-2.

§ 24. Echauffement anormal de l'enroulement statorique

24-1. Tout l'enroulement s'échauffe uniformément.

Surcharge de l'alternateur ou échauffement anormal du fer actif statorique.

Voir § 2, A, G et 23-1.

24-2. Une partie de l'enroulement statorique s'échauffe anormalement. Les tensions entre phases sont différentes. L'alternateur produit un ronflement anormal et fume. Si l'on ne désaccouple pas à temps l'alternateur du réseau et ne coupe pas la tension d'excitation, l'avarie peut provoquer un incendie.

Court-circuit entre spires, court-circuit entre deux phases ou mise à la masse de l'enroulement statorique en deux endroits.

Voir § 13-2, A, C et D.

§ 25. Echauffement anormal de l'enroulement d'excitation

25-1. L'échauffement d'excitation s'échauffe anormalement. Le courant d'excitation est trop intense.

A. *L'alternateur fonctionne sous une tension supérieure à la valeur nominale ou tourne à une vitesse inférieure à la valeur nominale.*

Voir § 23-1.

B. *L'alternateur fonctionne avec un facteur de puissance réduit, c'est-à-dire que sa puissance réactive est trop grande. Il en résulte une forte augmentation du courant d'excitation.*

Réduire la charge réactive ou (dans le cas de l'alternateur seul) prendre des mesures en vue d'améliorer le facteur de puissance; remplacer des moteurs faiblement chargés par des machines moins puissantes; éviter le fonctionement des moteurs en marche à vide; en cas de couplage en parallèle de plusieurs transformateurs, veiller à ce que tous les transforma-

teurs fonctionnent à pleine charge et que les transformateurs superflus soient débranchés; installer des condensateurs statiques ou un compensateur synchrone.

C. *Court-circuit entre spires ou mise à la masse en deux endroits de l'enroulement d'excitation.* Un tel défaut s'accompagne généralement d'une vibration de la machine (voir § 44-3, C).

Pour rechercher l'endroit de défaut, voir l'annexe 8.

§ 26. Echauffement anormal des bagues collectrices et des balais

26-1. Les bagues collectrices et les balais s'échauffent anormalement ce qui s'accompagne généralement de crachement aux balais.

Voir § 15 et annexe 4.

§ 27. Echauffements locaux dans les turbo-alternateurs

27-1. Echauffement anormal des nervures et des parois transversales de la carcasse de stator, des plateaux de serrage du fer statorique et de la clavette de fixation des plateaux.

La machine est parcourue par des courants vagabonds qui sont produits par des flux magnétiques sortant en dehors de limites du fer actif du stator. Ces courants vagabonds prennent naissance en cas d'une forte saturation du fer actif du stator. Généralement ils circulent même en cas d'une légère élévation de la tension au-dessus de la valeur admissible de 5 %. Par suite de la saturation, une fraction du flux magnétique quitte le fer actif et embrasse les circuits métalliques dans la carcasse du stator (fig. 11). Les lignes d'induction magnétique du flux principal passant par le fer actif du stator sont représentées en trait continu alors que les lignes d'induction magnétique qui dérivent vers la carcasse du stator sont montrées en pointillé. Le flux dérivé produit dans la machine une f.é.m. alternative. Les courants qui circulent le long des nervures se ferment généralement à travers les parties frontales de la carcasse: parois transversales, les plateaux de serrage et les paquets extrêmes de fer actif.

Les courants vagabonds peuvent prendre une forte valeur et provoquer des échauffements anormaux de ces organes de la machine. On constate un échauffement particuliè-

rement élevé des clavettes (fig. 12) qui fixent les plateaux de serrage (la fixation des plateaux au moyen de clavettes

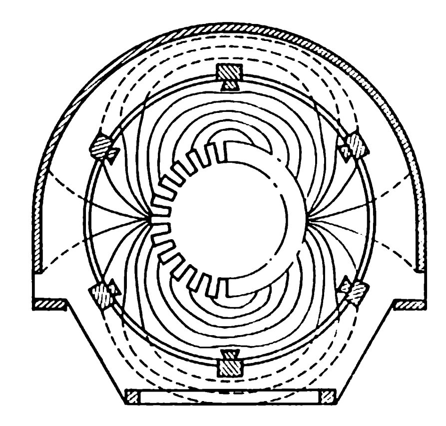


Fig. 11. Flux magnétiques se dérivant vers la carcasse d'un turbo-alternateur

se rencontre dans certains types de turbo-alternateurs d'ancienne construction) et des segments des paquets extrêmes de fer actif aux endroits où ils sont en contact avec les queues

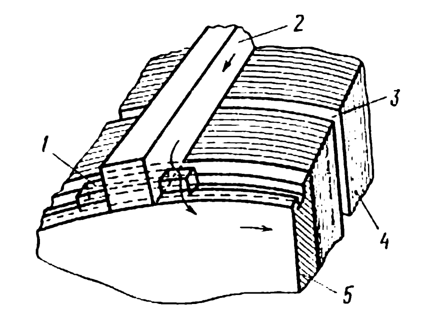


Fig. 12. Fixation du plateau de serrage du stator d'un turbo-alternateur:

1 : clavette ; *2* : nervure ; *3* : canal de ventilation ; *4* : fer actif ; *5* : plateau de serrage

d'aronde des nervures (voir fig. 11). Dans certains cas, l'échauffement excessif des contacts dans ces organes peut provoquer leur soudage et produire des étincelles.

Le moyen le plus efficace permettant d'éliminer ou de réduire l'intensité des courants vagabonds est le fonctionnement à tension normale.

Il convient de remarquer que l'échauffement excessif des plateaux de serrage, des clavettes et des paquets extrêmes de fer actif peut être également provoqué par d'autres causes (voir § 27-3). C'est pourquoi, avant de procéder au dépannage, il faut

s'assurer par un essai à vide et un essai en court-circuit que le diagnostic est correct.

27-2. Echauffement anormal des flasques, de la paroi et du revêtement de la carcasse du stator, des flasques internes et des boulons fixant les flasques sur la carcasse.

Une partie du flux magnétique se forme en dehors du fer actif statorique. La fig. 13 montre les lignes de flux magnétique qui dérivent vers les parties constitutives d'un turbo-alternateur. Ce flux magnétique étant variable, les courants

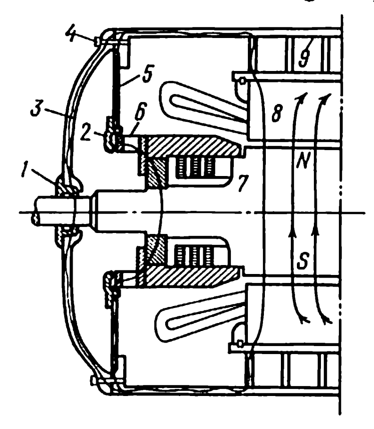


Fig. 13. Lignes magnétiques se dérivant vers les divers organes constitutifs d'un turbo-alternateur :

1 : dispositif d'étanchéité des flasques ; 2 : diffuseur ; 3 : flasque ; 4 : boulon ; 5 : tableau intérieur ; 6 : ventilateur ; 7 : rotor ; 8 : fer actif ; 9 : paroi de la carcasse

de Foucault, qui en résultent, provoquent l'échauffement des parties constitutives du turbo-alternateur.

L'examen des parcours empruntés par les lignes de flux magnétique dérivé montre que ces lignes se concentrant essentiellement près de l'arbre du rotor ainsi que dans les flasques intérieurs au voisinage du ventilateur du rotor. C'est pourquoi, l'échauffement le plus élevé peut s'observer justement en ces endroits. Vu cette circonstance, les constructeurs usinent les éléments se trouvant en ces endroits (les dispositifs d'étanchéité et les diffuseurs) en métal amagnétique.

Pour réduire l'échauffement des flasques près de l'arbre du rotor et celui des flasques intérieurs, il est recommandé d'augmenter les dimensions des pièces intercalaires en métal amagnétique. Dans ce même but, il est recommandé de remplacer les boulons d'acier servant à la fixation des flasques, par des boulons en laiton.

27-3. Echauffement anormal des parties frontales des enroulements statoriques, des plateaux de serrage du fer statorique, des clavettes, des plateaux de fixation, des flasques et des paquets extrêmes de fer actff.

Cet échauffement est provoqué par les flux de fuite émanant des parties frontales de l'enroulement statorique.

Un échauffement particulièrement élevé de ces parties s'observe dans les turbo-alternateurs d'ancienne construction.

Les flux de fuite des parties frontales de l'enroulement (fig. 14) se ferment à travers le paquet extrême *1* du stator,

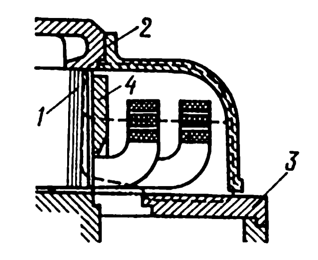


Fig. 14. Schéma de fermeture des lignes magnétiques de fuite des parties frontales de l'enroulement statorique :

1 : fer du stator ; *2* : flasque ; *3* : frette du rotor ; *4* : plateau de serrage

le flasque *2*, la frette du rotor *3*, le plateau de serrage *4* (la pièce intercalaire en métal amagnétique de la frette n'est pas hachurée sur la figure).

Le flux à travers des parties frontales de l'enroulement, qui est un flux variable, provoque l'échauffement des pièces se trouvant à leur voisinage. Le degré d'échauffement dépend de l'intensité des champs qui sont, à leur tour, déterminés essentiellement par la construction des têtes des bobines de l'enroulement, ainsi que par les propriétés du matériau dont sont faits les plateaux de serrage et les frettes de l'enroulement statorique. C'est ainsi qu'on constate un échauffement très élevé des parties frontales des enroulements des turbo-alternateurs d'ancienne construction réalisées sous forme de fourches massives. Leur échauffement qui provoque parfois la carbonisation des isolants et la détérioration des soudures peut occasionner une avarie de la machine.

La détérioration des soudures par suite de leur échauffement peut être également favorisée par leur disposition à des endroits où l'induction du flux de fuite est élevée.

Les plateaux de serrage, s'ils sont en acier magnétique ordinaire et les flasques du stator subissent aussi un échauf-

fement considérable surtout aux endroits d'entrée du flux de fuite.

Les clavettes fixant les plateaux de serrage peuvent être échauffées par des courants induits par le flux de fuite dans des circuits fermés qui peuvent être constitués par exemple par le plateau de serrage, la clavette, les boulons de fixation des têtes des bobines et l'applique métallique sur la partie frontale. L'échauffement des clavettes est également provoqué par des courants de Foucault dus au flux de fuite.

La suppression ou la réduction des échauffements qui se produisent pour des causes énumérées ci-dessus n'est possible qu'au prix des dispositions constructives compliquées. C'est ainsi que, dans les turbo-alternateurs modernes, on y arrive grâce à l'emploi d'enroulements statoriques à deux couches à pas raccourci, à une disposition conique des têtes des bobines, à l'emploi des frettes du rotor écartées ou des frettes en acier amagnétique (dans le cas où elles sont emmanchées sur le tambour de rotor), à l'emploi des plateaux de serrage en métal amagnétique ainsi qu'à l'abandon des clavettes qui ont été utilisées autrefois pour la fixation des plateaux de serrage.

Le seul moyen simple permettant d'atteindre le même but est la réduction de la charge en courant de la machine.

Etant donné que l'échauffement des clavettes, des plateaux de serrage et des paquets extrêmes de fer actif, ainsi que celui des flasques peut être provoqué par d'autres causes (voir § 27-1 et 27-2) il est nécessaire, pour établir la cause réelle des échauffements anormaux, de faire subir au turbo-alternateur un essai à vide et un essai en court-circuit. En marche à vide, la tension dans l'enroulement statorique est augmentée de 10 % par rapport à la tension nominale. L'essai en court-circuit est effectué pour une intensité nominale et, en cas des grosses machines, pour un courant égal à 80 % de la valeur nominale. Pour rechercher les causes d'un échauffement anormal des pièces non massives (par exemple, des clavettes) il peut s'avérer suffisant d'effectuer chacun de ces essais durant une demi-heure.

Si l'échauffement anormal des pièces s'observe en court-circuit et n'est pas constaté en marche à vide, c'est l'indice que sa cause est constituée par les flux de fuite des parties frontales de l'enroulement ; si l'échauffement se manifeste également en marche à vide, la cause en est les flux qui se dérivent vers les parties constitutives de la machine [1]).

27-4. Echauffement anormal de certaines portions de la surface du rotor, des cales d'encoche près des extrémités du tambour de rotor et des frettes aux endroits de leur emmanchement sur le tambour de rotor.

Charge asymétrique du stator ou court-circuit asymétrique. En cas d'une charge asymétrique du turbo-alternateur il se produit dans le tambour du rotor un flux magnétique qui provoque la circulation des courants à double fréquence (100 Hz) traversant une couche extérieure relativement mince. Ces courants se ferment par des surfaces de contact entre les cales d'encoche et les dents du rotor (principalement au voisinage des faces frontales du rotor) ainsi qu'entre les cales d'encoche et les dents avec frettes. La quantité de chaleur dégagée dans ces contacts est si grande que la température peut s'élever jusqu'à 500 ou même 700 °C; il peut en résulter le grillage des frettes aux endroits de leur mise sur le tambour de rotor. Cette température élevée réduit la résistance mécanique du métal ce qui est surtout dangereux pour les frettes (on connaît des avaries par suite des fissures dans les frettes et de l'écrouissement des frettes aux endroits de leur placement sur le tambour de rotor). En outre, les échauffements excessifs peuvent présenter un danger pour les isolants de l'enroulement statorique.

Une charge déséquilibrée est surtout dangereuse pour les rotors dont les frettes sont réalisées en fil d'acier (seulement dans les machines d'ancienne construction); il se produit alors une fusion de l'étain et un affaiblissement des verrous sur les frettes ce qui peut provoquer une avarie du turbo-alternateur.

---

[1]) Parmi les échauffements locaux des organes d'un turbo-alternateur indiqués au § 27-1, 27-2 et 27-3, les plus dangereux sont les échauffements des clavettes (on connaît de grosses avaries provoquées par la détérioration des clavettes) et des parties frontales de l'enroulement statorique, alors que les échauffements des flasques et des nervures de la carcasse n'entraînent aucun danger immédiat pour la machine.

Il est nécessaire de supprimer le déséquilibre. Les règles d'utilisation des centrales électriques et des réseaux admettent, pour les turbo-alternateurs un service continu à pleine charge avec un déséquilibre des courants dans les phases non supérieur à 10 % du courant nominal. Dans ces conditions, le courant ne doit dépasser la valeur nominale dans aucune phase. Pour une charge réduite, dont la valeur est déterminée par des essais, les alternateurs peuvent fonctionner avec un déséquilibre plus accentué des courants dans les phases.

L'usine « Electrossila » admet pour une charge continue une asymétrie des courants (c'est-à-dire le rapport de la différence entre le courant maximal et le courant minimal au courant maximal) jusqu'à 10 % pour les turbo-alternateurs comportant des frettes emmanchées sur le tambour de rotor et jusqu'à 15 % pour les alternateurs comportant des frettes écartées. Le courant dans la phase la plus chargée ne doit pas dépasser la valeur admise pour les conditions de fonctionnement données en cas de charge symétrique.

§ 28. Absence de tension en marche à vide de l'alternateur

28-1. L'excitatrice ne donne pas de tension.

Voir § 6.

28-2. L'excitatrice donne une tension normale mais le courant dans le circuit d'excitation de l'alternateur est absent.

Coupure ou mauvais contact dans les portions du circuit d'excitation de l'alternateur énumérées ci-dessous aux points A à G.

A. *Dans le régulateur magnétique.*

Vérifier et réparer le régulateur magnétique.

B. *Dans les connexions entre les pôles d'un rotor à pôles saillants.*

Vérifier le bon état des connexions interpolaires des bobines.

C. *Dans les connexions de sortie de l'une ou plusieurs bobines inductrices d'un rotor à pôles saillants.*

Réparer les connexions de sortie. Si cela est impossible, remplacer les bobines.

D. *Dans les conducteurs reliant l'enroulement aux bagues collectrices.*

Mesurer la résistance de l'enroulement. Si la résistance est nettement supérieure à sa valeur nominale ou le rotor présente une rupture, ouvrir les conducteurs et les réparer.

E. *Dans les conducteurs reliant l'excitatrice aux bagues collectrices.*

Vérifier avec un mégohmmètre ou une lampe de contrôle les conducteurs de raccordement ; en cas de rupture, rétablir la continuité.

F. *Entre les bagues collectrices et les balais à cause d'une forte usure des balais, de l'encrassement ou de l'oxydation des surfaces de contact, etc.*

Nettoyer avec soin de la boue les bagues collectrices, les balais et les porte-balais ; remplacer les organes usés.

G. *A l'intérieur d'une bobine inductrice (cas rare).*

Pour la localisation et les remèdes, voir annexe 8.

28-3. A la mise à l'excitation de l'alternateur, l'excitatrice fournit un courant trop intense. Dans certains cas, on constate aussi un crachement aux balais de l'excitatrice comme dans le cas d'un court-circuit (voir § 1-16, D).

Court-circuit entre les conducteurs reliant l'excitatrice aux bagues collectrices ou entre les bagues collectrices.

Le courant d'excitation peut également prendre une valeur excessive en cas d'un court-circuit de l'une ou plusieurs bobines inductrices mais dans ce cas l'alternateur donne sa tension normale.

Rechercher à l'aide d'un mégohmmètre ou d'une lampe de contrôle l'endroit de court-circuit et réparer.

§ 29. Tension en marche à vide de l'alternateur seulement entre deux phases

L'excitation est en bon état mais on n'obtient dans l'enroulement statorique de l'alternateur que la tension entre deux phases.

Coupure dans l'une des phases de l'enroulement statorique en cas de couplage en étoile ou rupture dans deux phases de l'enroulement en cas de couplage en triangle.

Localiser et supprimer la rupture (voir annexe 8). Si la rupture est dans les raccordements extérieurs de l'enroulement, rétablir la continuité. Quand la rupture se présente à l'intérieur de la bobine, la remplacer ou rebobiner.

§ 30. Tension trop basse en marche à vide de l'alternateur

30-1. L'excitatrice ne donne pas la tension nominale.

Voir § 6-1 à 6-6.

30-2. La vitesse de rotation de l'alternateur est trop lente.

Voir § 23-1, B.

30-3. La tension de l'alternateur à vitesse nominale de rotation et courant nominal d'excitation est inférieure à sa valeur nominale.

A. Voir § 13-1, C.

B. *Une ou plusieurs bobines de chaque phase de l'enroulement statorique sont couplées incorrectement et développent des flux opposés* (voir § 31-1).

Rétablir le couplage correct de l'enroulement statorique.

C. *Erreur de couplage des bobines inductrices à cause par exemple d'une alternance incorrecte des bobines à bobinage à droite et à gauche.*

Vérifier la polarité des bobines et assurer leur couplage correct (voir annexe 2).

D. *Court-circuit entre spires ou mise à la masse en deux endroits de l'enroulement d'excitation* (voir aussi § 25, C).

Pour localiser et réparer, voir annexe 8.

§ 31. Inégalité des tensions entre phases de l'alternateur en marche à vide

31-1. Les tensions entre phases sont différentes, l'enroulement statorique est froid.

Une ou plusieurs bobines de l'enroulement statorique sont connectées incorrectement (sont inversées) et développent des flux opposés, le nombre de connexions incorrectes des bobines n'étant pas le même dans les trois phases. Une telle erreur de couplage se rencontre rarement.

Vérifier les connexions des bobines et, en cas d'une erreur, rétablir les connexions correctes.

31-2. Voir § 24-2.

§ 32. Oscillations de tension de l'alternateur

La tension de l'alternateur oscille en permanence aussi bien en marche à vide qu'en marche à charge, la vitesse de rotation est constante.

Mauvais contact au circuit d'excitation.

Voir § 28-2.

§ 33. Oscillations de puissance et d'intensité du courant d'un alternateur seul

Voir § 7-4 et § 32.

§ 34. Défauts observés lors de la marche en parallèle des alternateurs

34-1. Le fonctionnement en parallèle des alternateurs est instable, le courant et la puissance oscillent. Ce « pompage » peut devenir si grand que l'alternateur se décroche.

Les indices de décrochage d'un alternateur sont les suivants : le courant statorique et la puissance présentent de fortes oscillations, leurs sauts sont nettement supérieurs à la valeur nominale et atteignent une valeur telle que les aiguilles des appareils de mesure dépassent l'échelle ; la tension aux bornes de l'alternateur et entre les barres oscille, en tombant généralement au-dessous de la norme ; le courant rotorique subit de fortes oscillations autour de sa valeur nominale ; les alternateurs produisent généralement un ronflement dont la tonalité varie au rythme du pompage des appareils de mesure.

A. *Défaut du régulateur du moteur d'entraînement. La différence entre les déséquilibres de marche des moteurs d'entraînement (machines à vapeur et moteurs à combustion interne) de certains alternateurs est trop grande surtout dans le cas où l'enroulement d'amortissement n'est pas utilisé dans les épanouissements polaires du rotor.*

Réparer les régulateurs des moteurs d'entraînement ; installer des réactances entre les alternateurs et les barres collectrices. Contacter le représentant du constructeur.

B. *La stabilité dynamique du système complexe sur lequel sont couplés les alternateurs est perturbée. Cette perturbation peut avoir pour causes le couplage ou le désaccouplage d'un ou plusieurs alternateurs ou d'un ou plusieurs récepteurs importants ainsi que les modifications du schéma des connexions du réseau, les avaries sur le réseau et surtout les courts-circuits.*

Parmi les mesures permettant d'élever la stabilité de fonctionnement on peut indiquer : un débranchement rapide des tronçons en court-circuit, le forçage d'excitation en cas de courts-circuits, l'emploi de rebranchement automatique des lignes, le sectionnement des lignes de transport de grande longueur, etc.

Etant donné que les actions à entreprendre par le personnel de service dépendent de toute une série de conditions il est nécessaire, en cas de pompage, de se conformer à l'instruction locale en vigueur à la centrale donnée.

34-2. L'alternateur n'est plus excité. Le régime de fonctionnement de l'alternateur est modifié : le courant rotorique est voisin de zéro, la tension entre les barres de l'alternateur est trop basse, la puissance lue sur le wattmètre est inférieure à sa valeur normale, le courant dans le stator est supérieur à sa valeur nominale, l'aiguille du phasemètre passe dans le quadrant capacitif, le wattmètre accuse une consommation de puissance réactive. L'alternateur s'est mis à fonctionner en régime asynchrone.

Voir § 28.

D'après les règles en vigueur (voir « Règles d'utilisation des centrales et réseaux électriques ») il est admis de faire fonctionner le turbo-alternateur en régime asynchrone sans excitation pendant 30 mn. Pour les turbo-alternateurs employant des rotors à frettes en fil d'acier ou des dents empilées, un tel fonctionnement n'est pas autorisé. La charge admissible pour le régime asynchrone est déterminée par les résultats des essais.

En ce qui concerne les alternateurs hydrauliques munis ou non d'un enroulement d'amortissement, leur fonctionnement en régime asynchrone n'est pas toléré. C'est pourquoi on doit les désaccoupler du réseau si l'on n'arrive pas à rétablir l'excitation.

34-3. L'alternateur fonctionne en moteur. Les indices témoignant du fonctionnement d'un alternateur en moteur

sont les suivants : l'inversion du sens de l'énergie active (le wattmètre dévie en sens inverse) ; la consommation de puissance réactive généralement accrue ; le courant statorique peut présenter une valeur légèrement inférieure à la valeur nominale ; la tension du stator ainsi que le courant et la tension d'excitation restent inchangés.

Non-arrivée de vapeur, de combustible ou d'eau par suite d'un défaut du régulateur du moteur d'entraînement.

Réparer le régulateur.

Un alternateur peut fonctionner en moteur pendant un temps illimité ; ce temps ne dépend que des conditions de fonctionnement du moteur d'entraînement.

34-4. **Des courants d'échange commencent à circuler entre les alternateurs couplés en parallèle bien que l'excitation soit correctement réglée.** Dans le cas des alternateurs à neutre sorti fonctionnant en parallèle, les courants égalisateurs peuvent passer également par le conducteur neutre.

Les formes de la courbe de f.é.m. des alternateurs sont très différentes.

Monter des bobines de réactance entre les alternateurs et les barres collectrices ainsi que dans le fil neutre. En mesurant les courants égalisateurs, on doit prendre en considération leur fréquence élevée et utiliser pour les mesures seuls les appareils dont les indications ne dépendent pas de la fréquence (de préférence les appareils thermiques).

§ 35. Aimantation de l'arbre

L'arbre est fortement aimanté (ce défaut se présente surtout avec les machines synchrones à grande vitesse).

Défaut de symétrie du champ magnétique dû à un court-circuit entre spires de l'enroulement rotorique.

Désaimanter l'arbre (voir annexe 9).

§ 36. Déplacement axial du rotor d'un turbo-alternateur

Un déplacement axial du rotor d'un turbo-alternateur peut se produire par suite de ses particularités constructives et pour des causes qui ne sont pas indiquées au § 46 pour toutes les machines électriques.

En marche à vide, aussi bien sans excitation qu'avec excitation, le rotor présente un battement axial normal dans les deux sens. En charge, il se produit un déplacement du rotor dans un sens et ce déplacement augmente avec la charge. Le déplacement du stator dans le sens opposé au déplacement du rotor fait croître, au lieu de diminuer, le déplacement du

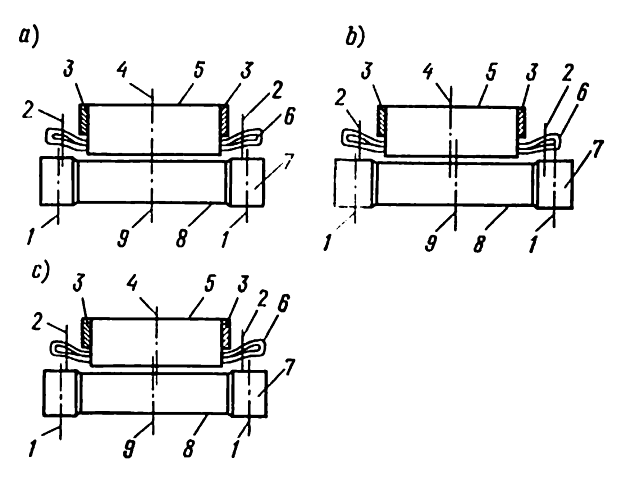


Fig. 15. Différentes positions d'un rotor à frettes magnétiques par rapport au stator:
a: en cas de symétrie des axes magnétiques du stator et du rotor; *b*: en cas d'asymétrie des axes des champs de fuite dans les parties frontales de l'enroulement statorique et des axes magnétiques du stator et du rotor (un jeu important du rotor dans un seul sens, dû au positionnement incorrect du stator); *c*: position établie du rotor en cas d'asymétrie des axes des champs de fuite dans les parties frontales de l'enroulement statorique et les frettes du rotor en cas d'un positionnement préalable correct du stator.
1: axe magnétique des frettes du rotor; *2*: axe des champs de fuite des parties frontales de l'enroulement statorique; *3*: plateau de serrage; *4*: axe magnétique du stator; *5*: fer actif du stator; *6*: partie frontale de l'enroulement statorique; *7*: frette de rotor; *8*: tambour de rotor; *9*: axe magnétique du rotor

rotor dans le sens précédent jusqu'à la butée, et la pression sur le palier augmente jusqu'à provoquer l'usure de la face frontale du coussinet.

Le rotor est muni de frettes en acier ordinaire et non en acier amagnétique spécial. La position normale du rotor par rapport au stator, en cas d'une symétrie parfaite des axes magnétiques, est représentée sur la fig. 15, *a*. Si les axes des champs de fuite des parties frontales de l'enroulement

statorique et les axes magnétiques des frettes présentent une asymétrie par rapport à l'axe du champ magnétique principal, le rotor sera déplacé, lors de la marche en charge de l'alternateur, dans un seul sens à cause de l'interaction entre les champs de fuite et les champs des frettes parce que l'effort axial dû aux champs de fuite des parties frontales de l'enroulement est plus grand que celui provoqué par les champs magnétiques principaux (fig. 15, *b*).

Pour déterminer la nature des frettes, c'est-à-dire pour établir si elles sont magnétiques ou amagnétiques, on présente près d'elles une aiguille magnétique. Si l'aiguille est attirée c'est l'indice que la frette est magnétique, dans le cas contraire elle est amagnétique.

Pour remédier au déplacement axial du rotor lors de la marche en charge de l'alternateur, il est nécessaire de déplacer le stator dans le sens de déplacement du rotor si les frettes sont magnétiques et dans le sens opposé si les frettes sont amagnétiques. Le déplacement du stator dans le sens de déplacement du rotor, c'est-à-dire l'éloignement de la frette du rotor des parties frontales de l'enroulement statorique d'un côté de l'alternateur et le rapprochement de l'autre côté de la machine permet d'équilibrer l'action des champs de fuite des parties frontales de l'enroulement statorique sur les frettes.

Il en résulte que le rotor occupe une certaine position médiane (fig. 15, *c*).

C'est d'après cette position qu'il convient d'installer les paliers afin d'éviter le heurt du rotor contre l'un d'eux et de rendre autant que possible égaux les jeux axiaux du rotor dans les deux sens.

Etant donné qu'un écart, même minime, du rotor à partir de cette position médiane pourra provoquer son déplacement jusqu'à la butée contre le bout du coussinet (par suite des efforts toujours plus grands exercés du côté où la distance entre les axes des parties frontales de l'enroulement et de la frette devient plus faible), le battement radial du rotor doit être rendu aussi petit que possible mais en tenant compte de la dilatation thermique du rotor.

Il résulte de ce qui précède que le déplacement du stator modifie la position en coïncidence des axes

du stator et du rotor (fig. 15, *c*) de sorte que lors de la marche à vide d'un alternateur excité le rotor pourra subir un certain déplacement dans le sens opposé et pourra donc heurter l'un des paliers ; un tel phénomène se présente assez souvent avec les rotors à frettes magnétiques. Si cet heurt est peu considérable, le battement du rotor peut être laissé tel quel, mais s'il y a à redouter que le rotor pourra provoquer l'usure du bout du coussinet, il est nécessaire de gratter le coussinet ou de déplacer le palier.

§ 37. Démarrage en asynchrone difficile d'un moteur synchrone

37-1. Voir § 16-1.

37-2. Le moteur ne démarre pas ; le courant est absent dans l'une des phases du stator.

Voir § 16-2.

37-3. Le moteur ne démarre pas ou démarre mais ne prend pas sa vitesse normale ; l'intensité du courant est identique dans toutes les trois phases.

A. *La tension du réseau au démarrage est trop basse ; le démarrage du moteur est assuré depuis une prise non appropriée de l'autotransformateur ou à travers une réactance mal choisie.*

Mesurer la tension du réseau aux bornes primaires de l'autotransformateur de démarrage ou de la réactance ; si cette tenson est de 10 à 15 % inférieure à la valeur minimale, elle peut être la cause de ce que le moteur ne démarre pas. Dans ce dernier cas il convient d'élever la tension du réseau jusqu'à la valeur nominale. Si cela est impossible, ou si la tension du réseau s'avère normale, il convient, pour élever la tension de démarrage, de commuter le moteur sur le plot suivant de l'autotransformateur de démarrage ou de la réactance.

En cas d'emploi d'un autotransformateur à prises sur le primaire, on peut élever la tension secondaire (de démarrage) par des commutations convenables de l'enroulement primaire.

Quand le démarrage est réalisé par l'intermédiaire d'une réactance, la tension du démarrage peut être augmentée, en diminuant la réactance de la bobine par une simple augmentation de l'entrefer

entre les moitiés supérieure et inférieure du noyau. Si l'augmentation de l'entrefer s'avère impossible, il est nécessaire de réduire le nombre de spires de la bobine.

B. *Charge au démarrage trop élevée.*

Réduire la charge au démarrage.

C. *Lors du démarrage par autotransformateur la tension d'excitation est appliquée au moteur non à la totale (nominale) aux bornes du stator mais sous une tension réduite.* Il en résulte que le moteur ne peut pas développer un couple voisin du couple d'accrochage (couple pour une vitesse égale à 95 % de la vitesse de synchronisme) nécessaire à l'accrochage du moteur.

Modifier le schéma de démarrage du moteur de sorte que le démarrage s'effectue avec l'application de l'excitation lorsque la tension aux bornes du stator a sa valeur nominale.

Il convient de remarquer qu'on peut réaliser de bonnes conditions de démarrage d'un moteur synchrone en assurant son démarrage pour une tension totale du réseau, c'est-à-dire le démarrage direct sans emploi de dispositifs de démarrage (autotransformateur, réactance). Avec un tel procédé de démarrage on obtient une simplification considérable du schéma de démarrage : comme le montre l'expérience, l'enroulement rotorique de démarrage s'échauffe moins que lors du démarrage à tension réduite. Ainsi, le démarrage direct permet de simplifier considérablement l'exploitation du moteur sans compromettre sa sécurité de fonctionnement. Aussi, dans le cas où le moteur démarre difficilement, faut-il passer au démarrage direct. Pour la plupart des moteurs alimentés depuis un réseau suffisamment puissant, un tel démarrage est parfaitement admissible et ne présente aucun danger pour le moteur électrique.

Dans certains cas, pour effectuer un tel démarrage il peut s'avérer nécessaire de renforcer la fixation des parties frontales de l'enroulement statorique. Ce n'est que dans des cas assez rares, quand il s'agit par exemple, des moteurs de très grande puissance (compensateurs synchrones), le démarrage direct peut s'avérer inadmissible ou indésirable.

La décision de passer au démarrage direct du moteur doit être prise avec l'accord du constructeur.

D. *Court-circuit entre spires dans certaines bobines de l'enroulement d'excitation.*

Rechercher les bobines défectueuses (annexe 8) et les réparer ou remplacer.

37-4. Les mêmes constatations que celles indiquées au § 37-3 mais on observe parfois dans le rotor des coups de feu ou des étincelles.

Mauvais contacts dans l'enroulement de démarrage (*d'amortissement*) *ainsi qu'aux endroits de connexion de certaines tiges avec les couronnes de court-circuit ou dans les barrettes reliant entre eux les segments de la couronne de court-circuit.*

Vérifier tous les contacts dans l'enroulement de démarrage. Les tiges dont le contact avec les couronnes est en mauvais état sont à souder à la soudure réfractaire; pour la vérification, les connexions entre les segments des couronnes de court-circuit doivent être ouvertes parce qu'il y a un risque d'oxydation des surfaces de contact non décelable au cours de la visite extérieure.

Nettoyer avec soin toutes les surfaces de contact et, s'il y a lieu, les ajuster et étamer.

37-5. Le moteur ne démarre pas et produit un fort ronflement. L'intensité du courant est différente dans toutes les trois phases. Une partie de l'enroulement statorique s'échauffe anormalement.

Voir § 13-2.

37-6. Les mêmes constatations que celles indiquées au § 37-5 mais l'enroulement statorique ne chauffe pas.

Défaut de l'autotransformateur de démarrage ou erreur de couplage à l'intérieur de l'enroulement statorique (voir § 30-3,B).

Pour rechercher la cause du défaut il convient de débrancher le moteur de l'autotransformateur de démarrage (de la réactance de démarrage) et de brancher ce dernier sur le réseau sans moteur et mesurer la tension sur toutes ses sections (dérivations). Si les tensions entre phases sont différentes ou si l'on constate un autre défaut quelconque, il est nécessaire de remettre en bon état l'autotransformateur. Si le transformateur est sain, c'est le moteur qui doit être incriminé.

Vérifier les connexions des bobines et, en cas d'erreur de couplage, assurer des connexions correctes.

§ 38. Pompage et décrochage d'un moteur synchrone

38-1. Lors de la marche du moteur on observe des oscillations (un pompage) du rotor visibles d'après les oscillations des aiguilles de l'ampèremètre et du wattmètre montés dans le circuit statorique. Aucune autre anomalie n'est constatée dans le moteur. Les oscillations peuvent être si fortes qu'elles provoquent le décrochage du moteur.

A. *Variation brusque de charge.*

Augmenter le courant d'excitation du moteur. Dans de nombreux cas cette mesure permet de réduire considérablement les oscillations.

B. *Oscillations provenant des mécanismes entraînés, par exemple des compresseurs à piston, des pompes, etc.*

Voir § 38-1, A.

C. *Fortes variations de tension et de fréquence.*

On constate des coups dynamiques à cause des courts-circuits dans le réseau d'alimentation ou (dans le cas du système moteur-générateur) à cause des courts-circuits dans le réseau alimenté par le générateur.

Le forçage d'excitation (l'application de la tension d'excitation maximale) permet d'améliorer la stabilité de la marche du moteur pendant ces phénomènes transitoires.

38-2. Le moteur décroche. Les causes indiquées au § 38-1 ne sont pas constatées.

A. *Surcharge du moteur.*

Réduire la charge.

B. Voir § 28-2.

C. *Défaut (court-circuit, coupure, etc.) dans le réseau alimentant le rotor du moteur (en cas d'excitation depuis un réseau à courant continu indépendant).*

Localiser à l'aide d'un mégohmmètre le court-circuit ou la coupure (voir annexe 8) et réparer.

D. *Défaut dans le réseau alimentant le stator.*

Voir § 37-3, C.

38-3. Après la mise sous tension du moteur et l'établissement de la charge normale, le courant statorique croît progressivement et atteint sa valeur maximale admissible pour laquelle le moteur se débranche automatiquement.

L'excitatrice en bout d'arbre fonctionne sans crachement pour une tension relativement faible. Les sections à commuter produisent par suite d'une commutation accélérée, une aiman-

tation longitudinale supplémentaire des pôles principaux (voir annexe 10 et fig. 6) assez sensible en ce régime de fonctionnement de l'excitatrice, ce qui provoque une croissance progressive du courant rotorique.

S'assurer que les balais sont calés sur la ligne neutre (voir annexe 4), après quoi déplacer la couronne porte-balais de 1 ou 2 lames du collecteur dans le sens de rotation de la machine.

Chapitre 4

DÉFAUTS COMMUNS À TOUTES LES MACHINES ÉLECTRIQUES

§ 39. Formation de taches sur les collecteurs et les bagues collectrices des machines au repos. Usure inégale des collecteurs, des bagues et des balais

39-1. Des taches de teint mat se forment sur les collecteurs et sur les bagues collectrices; parfois des traces d'oxydes apparaissent sous les balais. Ces taches ne s'observent qu'après une inaction plus ou moins prolongée des machines. Lorsque la machine est remise en service, ces taches provoquent le crachement aux balais; les endroits recouverts des taches brûlent et deviennent rugueux, ce qui intensifie la production d'étincelles.

Lorsque la machine fonctionnant dans un local humide est mise au repos, le balai, le collecteur (la bague collectrice) et l'air humide constituent une pile électrique qui fait circuler un courant dans le circuit fermé comprenant le balai, le collecteur (la bague collectrice), la couronne porte-balais, l'enroulement d'excitation et d'autres pièces. Ces phénomènes électrochimiques se manifestent de façon particulièrement intense dans le cas où les bagues collectrices sont en acier ainsi qu'en cas d'emploi de certains types de balais graphitiques.

Si la machine arrêtée pour un repos prolongé, est mise au magasin de stockage ou doit être transportée, il convient d'interposer entre les balais et le collecteur (les bagues collectrices), une feuille de presspahn ou d'un autre isolant pour interrompre ainsi le circuit du courant galvanique.

Pour éliminer les taches constatées et supprimer le crachement d'étincelles qu'elles entraînent il faut rectifier le collecteur (les bagues collectrices) comme il est indiqué dans l'annexe 4.

39-2. Des taches apparaissent sur les bagues des commutatrices et des alternateurs synchrones en marche.

A. *Dans les commutatrices, les taches se forment si les balais sont calés de manière qu'à chaque tour du rotor l'intensité maximale du courant alternatif tombe sur le même endroit de la bague et le courant circule du balai à la bague toujours dans le même sens. Il en résulte une surcharge de la bague en cet endroit.* Au cours d'utilisation, de petites taches peuvent se transformer en des endroits piqués et rugueux ce qui provoque le crachement aux balais.

B. *Dans les alternateurs monophasés, la formation de taches sur les bagues collectrices peut être provoquée par le champ synchrone inverse.* On sait que le champ magnétique d'un alternateur monophasé peut être considéré comme étant constitué par deux champs tournant à la même vitesse mais dans des sens opposés, dont l'un tourne en synchronisme avec le rotor et l'autre dans le sens opposé. Ce dernier, dit champ synchrone inverse, traverse l'enroulement rotorique à la double fréquence et y induit un courant de double fréquence qui s'ajoute au courant continu de la machine, en produisant dans le circuit fermé de l'enroulement rotorique un courant ondulé. Les endroits des bagues qui subissent une action répétée du courant maximal se trouvent surchargés et s'usent donc plus vite ce qui constitue la cause du crachement anormal aux balais.

C. *Dans les alternateurs triphasés, les taches sur les bagues collectrices peuvent avoir pour cause une charge déséquilibrée (par des courants de séquence négative).*

> Enlever ces taches aux bagues collectrices par leur tournage et rectification (voir annexe 4). Pour prévenir la formation de telles taches dans le cas des commutatrices, modifier la position des balais sur les bagues collectrices.

39-3. Les bagues collectrices des machines synchrones présentent une usure inégale. L'usure de la bague négative est plus accusée que celle de la bague positive, la surface de travail de la première devient mate et rugueuse alors que celle de la deuxième garde son poli normal. L'usure des balais placés sur la bague négative est aussi plus grande que celle des balais positifs. Cette usure inégale est plus prononcée dans le cas des bagues en bronze et en cuivre que pour des bagues d'acier.

Le courant transporte des particules de métal de la bague négative sur le balai et ce phénomène est d'autant plus intense que la charge de courant est plus élevée.

Eliminer les aspérités de la bague par le tournage et la rectification (voir annexe 4). Pour prévenir une usure irrégulière par la suite, changer périodiquement, deux fois par an, par exemple, la polarité des bagues collectrices.

39-4. Le collecteur et les bagues collectrices présentent une usure anormale et non uniforme.

A. *Les balais ne conviennent pas* (*trop durs*). Lors du fonctionnement normal, il se forme sur la surface du collecteur (des bagues collectrices) une couche d'oxydes très mince appelée « poli » ou « glaçage » qui améliore la commutation et protège le collecteur (les bagues collectrices) contre une usure prématurée. Quand les balais sont trop durs, ils grattent cette couche.

Remplacer les balais par des balais nouveaux de qualité recommandée par le constructeur. En l'absence de recommandations du constructeur, voir annexe 5.

B. *Pression exagérée des balais sur le collecteur* (*les bagues collectrices*).

Régler la pression des balais à la valeur prescrite par le constructeur. Voir aussi annexe 5.

C. *Les balais montés sur le collecteur* (*les bagues collectrices*) *sont de natures différentes, y compris de qualité non appropriée, ce qui provoque la formation de « gorges » circulaires sur la surface du collecteur* (*des bagues collectrices*).

Monter sur la machine les balais de même nature correspondant aux prescriptions du constructeur.

Si cela est impossible à réaliser, installer sur chaque console les balais de même qualité.

D. *Les balais positifs et négatifs provoquent une usure inégale du collecteur ce qui favorise la formation de « gorges ».*

Pour rendre uniforme l'usure du collecteur, il convient de disposer les balais sur le collecteur avec un certain décalage de manière que les balais d'une paire de consoles voisines frottent sur les unes des gorges du collecteur et les balais de l'autre paire sur les autres gorges. Pour le calage des balais, voir annexe 4.

E. *Vibrations de l'induit* (*du rotor*).

Voir § 44.

39-5. Usure exagérée des balais.

A. Voir § 39-3 et 39-4, B.

B. *Les balais placés sur le collecteur sont de qualité non appropriée ; ils sont trop tendres ou ne correspondent pas à la vitesse circonférentielle prévue.*

Voir § 39-4, A.

C. *Densité de courant trop élevée dans les balais.*

Voir § 39-4, A.

D. *Surface du collecteur (des bagues collectrices) rugueuse.*

Tourner et rectifier le collecteur (voir annexe 4).

E. Voir § 39-4, E.

F. *Fortes étincelles aux balais dues à une mauvaise commutation.*

Améliorer la commutation (voir annexe 7).

G. *Répartition inégale du courant entre les balais.*

Vérifier si la pression des balais sur le collecteur est uniforme ; régler tous les balais de manière que leur pression soit dans les tolérances.

Vérifier l'état de tous les contacts aux balais, resserrer tous les boulons et s'assurer à nouveau du bon état des contacts, en utilisant la méthode de la chute de tension (voir annexe 8).

H. *Le collecteur (les bagues collectrices) est encrassé par la poudre provenant des balais ou par une poudre de métal, de sable ou de ciment provenant de l'extérieur.*

Améliorer l'entretien du collecteur (des bagues collectrices) et des balais, en assurant des nettoyages plus fréquents et plus soignés ; protéger la machine contre la pénétration des poussières extérieures.

§ 40. Mise à la masse des enroulements

Dans ce qui suit sont énumérées les causes possibles de la mise à la masse et les remèdes.

40-1. Les enroulements sont pénétrés d'humidité : au cours du transport ; par suite d'un stockage de longue durée des machines dans un local humide non chauffé ; lors des repos prolongés surtout par temps humide ; par l'introduction de l'eau à l'intérieur de la machine, par exemple, en cas de rupture des conduites d'eau, lors d'un incendie, d'une inondation, etc. ; par suite de l'action des vapeurs d'eau en cas de manque d'étanchéité dans les tuyauteries de vapeur passant dans la salle des machines.

Prévenir l'humidification des enroulements pendant le stockage des machines, en équipant les

entrepôts d'une bonne ventilation; choisir pour le stockage des machines seulement des locaux secs.

En arrêtant pour un repos prolongé une machine munie d'une ventilation par refoulement il est nécessaire de fermer tous les registres d'air aspiré et d'air évacué par temps humide et, au contraire, de les maintenir ouverts par beau temps sec.

Si les périodes de fonctionnement de la machine alternent avec des repos prolongés il convient d'installer des réchauds électriques spéciaux en les mettant sous tension pour la durée des arrêts de la machine (comme cela se fait dans les cas des machines de commande des laminoirs).

Pour le fonctionnement dans une ambiance humide, il faut utiliser soit des machines fermées soit des machines à isolation résistante à l'humidité.

Pour éviter la mise à la masse des enroulements, les machines pénétrées d'humidité doivent être soumises au séchage avant leur remise en service.

40-2. La machine est encrassée.

A. *Une usure exagérée des balais, des collecteurs et des bagues collectrices provoque la formation de ponts conducteurs en poudres de charbon et de cuivre.*

Voir § 39-4 et 39-5.

B. *L'air poussiéreux de la salle des machines est aspiré, par suite des défauts d'étanchéité, à l'intérieur de la machine munie d'une ventilation en circuit fermé ou ouvert; la même chose se produit en cas du fonctionnemuent défectueux des filtres à air.*

Etancher la carcasse de la machine et les carneaux d'air ou remettre en état les filtres à air.

C. *Pénétration des poussières dans la salle des machines.* Dans les locaux industriels des entreprises métallurgiques et charbonnières, dans les ateliers de laminage, dans les cokeries, etc., les poussières sont si fines et légères qu'elles se déposent non seulement sur les collecteurs, les bagues collectrices et les parties extérieures des bobinages mais pénètrent aussi à l'intérieur de la machine et atteignent des endroits où leur pénétration paraît impossible; les poussières forment des ponts conducteurs de courant qui peuvent provoquer à la longue des contournements ou des défauts à la masse.

Les machines installées dans de tels locaux doivent être refroidies par de l'air amené de l'extérieur. En cas de nécessité, il faut soit employer des filtres, soit étancher les machines, en consultant à cet effet le constructeur.

Il y a lieu de noter que dans les grosses machines à grande vitesse (turbo-alternateurs) l'encrassement des têtes des bobines par une poussière semi-conductrice présente un danger bien grave, étant donné que sous l'effet des courants capacitifs cette poussière s'échauffe à un tel point qu'elle peut s'enflammer et donc provoquer un incendie dans la machine.

D. *La surveillance de la machine et son entretien sont insuffisants.*

Maintenir la machine en parfait état de propreté, la nettoyer chaque jour; observer strictement la périodicité des visites et des travaux d'entretien réguliers; si l'encrassement est très grand, réduire la durée de la période entre les visites d'entretien et augmenter le nombre de nettoyages effectués avec la sortie du rotor.

40-3. Pénétration des objets étrangers (copeaux de métal, poussière métallique ou abrasive, etc.) dans les bobinages.

Protéger les bobinages contre la pénétration de la poussière métallique et autre surtout lors du tournage et de la rectification des collecteurs et des bagues collectrices. A cet effet, il convient, à titre temporaire, de coller les bobinages avec du papier ou de les envelopper avec une toile.

40-4. L'atmosphère de la salle des machines est saturée de vapeurs d'acides, de vapeurs d'alcalis ou de gaz (industries chimiques). Ces vapeurs et gaz détériorent progressivement l'isolation des bobinages.

Dans de tels locaux, il convient d'utiliser seulement des machines fermées, comportant une isolation résistante aux agents agressifs et munies d'une ventilation en circuit ouvert amenant de l'air frais de l'extérieur ou des machines à carcasse ventilée.

40-5. Un échauffement anormal de la machine pendant une longue durée rend son isolation fragile et hygroscopique.

Voir §§ 2, 3, 5, 11 à 14, 22 à 25.

40-6. Les forces électromagnétiques qui prennent naissance en cas des courts-circuits ainsi que les surtensions qui

apparaissent sur le réseau d'alimentation peuvent provoquer, lorsque les enroulements d'excitation de la machine sont mis hors tension, un contournement des bobinages par un arc électrique et un défaut à la masse.

40-7. Usure naturelle (vieillissement) de l'isolation.

Dans le but de prolonger la durée de vie de l'isolation il est recommandé de vérifier avec soin son état et de mesurer périodiquement la résistance d'isolement entre les bobinages et la masse ainsi qu'entre les bobinages qui ne sont pas en liaison électrique, pour pouvoir procéder, s'il y a lieu, à un entretien préventif de l'isolation ou la revêtir d'un vernis isolant.

§ 41. Défectuosités des soudures des bobinages et des frettes, échauffement exagéré des contacts

41-1. Les jonctions au collecteur, les collerettes des induits ou des rotors se sont dessoudées; d'autres soudures des bobinages sont en mauvais état.

A. *Mauvaise exécution des opérations de soudage.*

Refaire les soudures défectueuses et vérifier leur qualité (voir annexe 8).

B. *Emploi d'une soudure de qualité non appropriée qui est trop tendre pour le régime de démarrage ou de fonctionnement donné de la machine.*

Pour les jonctions du collecteur, il est recommandé d'employer des soudures à l'étain de marques ПОС-30, ПОС-40 et ПОС-60 (le nombre qui suit les lettres désigne le pourcentage de l'étain).

Il y a lieu de noter qu'avec l'augmentation de la teneur en étain la soudure pénètre plus facilement dans les interstices entre les surfaces qui doivent être soudées ensemble mais sa température de fusion s'abaisse.

Si les soudures des radiales du collecteur et les soudures des bobinages s'avèrent insuffisamment résistantes à la chaleur en cas d'un régime de fonctionnement pénible, il convient de remplacer la soudure à l'étain par une soudure au phosphore (alliage de 9 à 12% de phosphore et 91 à 88% de cuivre).

Pour le soudage des enroulements dans des grosses machines, et notamment des bobines rotoriques dans les machines synchrones, des barres des rotors à cage dans les machines asynchrones, ainsi que des enroulements de démarrage (d'amortissement) dans les machines synchrones on peut aussi employer des soudures à l'argent (par exemple, ПСр-45 ou ПСр-15, GOST 8190-56, dont la température de fin de fusion est respectivement de 720 et 800 °C).

C. *Densité de courant trop élevée aux endroits de soudure des radiales du collecteur ou des collerettes.*

Augmenter la largeur des radiales ou la longueur des collerettes.

41-2. Dessoudure des cosses de câbles et des connexions entre les bobines.

A. Voir § 41-1, A.

B. *Emploi d'une soudure à trop bas point de fusion.*

Remplacer les soudures à l'étain par des soudures au phosphore (voir § 41-1, B) ou procéder par soudage par résistance.

41-3. Frettages en fil d'acier dessoudés.

A. Voir § 41-1, A.

B. *Emploi d'une soudure à trop bas point de fusion.*

Remplacer par une soudure à point de fusion plus élevé (la plus appropriée est la soudure ПОС-30).

C. *Valeur trop élevée des pertes par courants de Foucault et par hystérésis dans les frettages.* Les pertes accrues dans les frettages apparaissent à cause de la soudure des frettages sur toute leur largeur ce qui assure le meilleur contact entre les fils d'acier placés l'un à côté de l'autre. Dans les moteurs asynchrones, les pertes dans les frettages atteignent leur valeur maximale pendant le démarrage et lors du fonctionnement à fort glissement (à faible vitesse de rotation). Dans les machines à courant continu, les plus grandes pertes s'observent pour des grandes vitesses de rotation.

Souder les frettages seulement près des agrafes (dans le cas des machines à faible vitesse) et non sur toute leur largeur. Diviser des frettages ayant une grande largeur en deux parties comportant chacune une moitié du nombre total de spires. Dans les frettages à couches multiples (employés dans les machines à grande vitesse), isoler les couches, les

unes des autres, par interposition des feuilles d'amiante.

D. *Mauvaise disposition des supports entre les frettes voisines* (fig. 16, *a*). Elle consiste en ce que les supports sont placés à une distance égale au pas polaire τ, de sorte que le circuit fermé *a* — *b*—*d*—*c*, qui en résulte, sera le siège d'une force électromotrice induite et sera donc parcouru par un courant alternatif. Un phénomène pareil, mais moins intense, peut également se produire en cas d'une

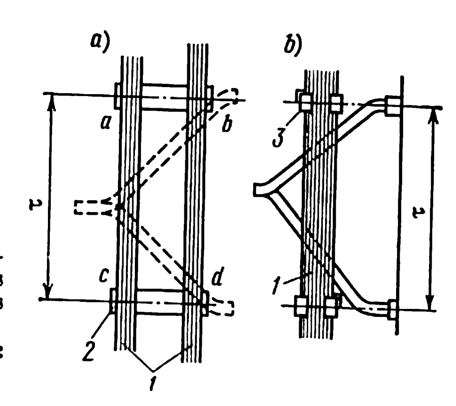


Fig. 16. Mauvaise disposition des supports de frettages (*a*) et des agrafes sur les frettages (*b*):
1: frettage; *2*: support; *3*: agrafe

mauvaise disposition des agrafes (fig. 16, *b*), si le frettage est soudé seulement près des agrafes et non sur toute sa longueur.

Placer les supports et les agrafes des frettes à une distance égale au double pas polaire, si cela est admissible au point de vue de la robustesse mécanique du frettage.

41-4. Echauffement anormal des contacts aux bornes de la machine pouvant provoquer la dessoudure des cosses de câbles.

A. *Serrage insuffisant des écrous sur les boulons de contact.*

Resserrer les écrous.

B. *Section trop faible des boulons de contact.*

Renforcer la section des boulons de contact de manière à assurer la pression de contact nécessaire; le diamètre du boulon, en millimètres, ne doit pas être inférieur à $\sqrt{I}$, I étant l'intensité du courant en ampères.

§ 42. Défauts des paliers lisses. Pénétration de l'huile à l'intérieur de la machine

42-1. Les paliers chauffent exagérément. [1]

A. *Débit d'huile insuffisant.*

Dans les machines lubrifiées *par bagues*, ce défaut peut être provoqué par les causes suivantes: l'engorgement des bagues de graissage; une rotation trop lente des bagues de graissage et parfois, leur arrêt complet, lors du fonctionnement de la machine, par suite du choix des bagues trop légères, de l'aimantation des bagues d'acier ou d'un fort épaississement de l'huile; une forme incorrecte (non ronde) des bagues; un niveau trop bas d'huile dans le palier.

Dans les machines à lubrification *forcée* (au moyen d'une pompe à huile) le même résultat est constaté en cas d'obstruction de la canalisation d'huile ou du filtre à huile, des défauts de la pompe à huile ainsi qu'en cas des passages trop étroits dans un raccord par brides quelconque ou dans le diaphragme de la canalisation de refoulement d'huile et en cas d'une baisse du niveau d'huile dans le réservoir en charge.

Dans le cas de paliers lubrifiés *par bagues*, vérifier l'état des bagues de graissage; redresser ou remplacer les bagues défectueuses (faussées); remplacer les bagues légères par des bagues plus lourdes; en cas d'aimantation des bagues d'acier, les remplacer par des bagues en laiton; changer l'huile épaissie; vérifier le niveau d'huile d'après l'indicateur.

Dans le cas de paliers lubrifiés *par injection* d'huile, vérifier l'état des canalisations d'huile, du filtre à huile et de la pompe à huile; vérifier les passages dans les raccords par brides et dans le diaphragme et les porter, s'il y a lieu, aux dimensions normales.

B. *Huile polluée par la poussière qui s'est introduite dans les chambres à huile des paliers ou par la rouille en provenance des canalisations d'huile et parfois par des restes de la terre de moulage.*

Nettoyer et laver tout le circuit de graissage à l'huile (canalisation d'huile, filtre, etc.); nettoyer

---

[1] Pour les températures maximales admissibles, voir annexe 16.

les chambres à huile des paliers de toutes les impuretés et notamment de la terre de moulage et les peindre avec un émail résistant à l'huile, changer l'huile, parfaire l'étanchéité des paliers.

C. *Pénétration de l'eau dans l'huile par suite des défauts d'étanchéité du réfrigérant d'huile et, dans le cas des turbo-alternateurs, à travers les paliers de la turbine ou les joints à labyrinthes laissant s'échapper beaucoup de vapeur.*

Supprimer tout manque d'étanchéité dans le réfrigérant d'huile; prendre des mesures en vue de prévenir l'échappement de grande quantité de vapeur aux joints à labyrinthes de la turbine; envoyer l'huile à l'analyse chimique.

D. *Mauvais refroidissement de l'huile dans le réfrigérant à cause de la quantité insuffisante de l'eau de refroidissement ou de sa température trop élevée.*

Augmenter le débit d'eau de refroidissement ou prendre des mesures en vue d'abaisser la température de l'eau entrant dans le réfrigérant d'huile.

E. *Remplissage avec une huile mal adaptée.*

Choisir la qualité d'huile conformément aux recommandations du constructeur. Pour le choix de la qualité, voir annexe 15.

F. *Jeu insuffisant entre le tourillon de l'arbre et le coussinet ou coussinet mal ajusté.*

Assurer le jeu préconisé par le constructeur ou procéder comme il est indiqué dans l'annexe 12.

Pour la mesure et le réglage des jeux, voir annexe 12.

L'ajustement du coussinet de palier peut être considéré satisfaisant si les traces d'ajustage se forment uniformément sur toute la longueur de la coquille inférieure sur un arc de 25 à 30°.

G. *Le tourillon de l'arbre est devenu rugueux par suite de son attaque par les courants circulant dans les paliers ou à cause de la mauvaise qualité de l'huile.*

Rectifier le tourillon de l'arbre. Pour les mesures permettant de supprimer les courants dans les paliers, se reporter à l'annexe 9. Envoyer un échantillon d'huile à l'analyse. Si les résultats de l'analyse montrent que l'huile est de mauvaise qualité, la changer.

H. *La qualité de l'alliage antifriction utilisé pour le régulage du coussinet ne correspond pas aux conditions de service de ce dernier*; *mauvaise exécution de l'opération de régulage.*

Refaire le régulage du coussinet en utilisant l'alliage antifriction préconisé par le constructeur.

I. *Gauchissement de l'arbre ou de son tourillon*; *mauvais montage* (*centrage*) *de la machine.*

Dégauchir l'arbre ou le tourillon par son dressage convenable. Pour le centrage de la machine, se reporter à l'annexe 13.

J. *Répartition incorrecte de la charge entre les paliers dans le cas de groupes à plusieurs machines* (*en présence de rotors à un seul appui*). En cas d'un mauvais centrage de tels groupes les uns des paliers seront surchargés par suite d'une décharge des autres paliers. Les paliers les plus chargés chaufferont exagérément.

Malgré un montage primitif correct du groupe, ce défaut peut survenir au cours de l'utilisation par exemple en cas de fusion de l'alliage antifriction de l'un des paliers, à cause du ramollissement de la couche de régule, le niveau d'un tourillon quelconque peut s'abaisser ce qui entraînera une surcharge des paliers adjacents.

Assurer le centrage des groupes à plusieurs machines en se conformant aux prescriptions de l'annexe 13.

K. *Charge radiale excessive sur le palier à cause d'une tension trop élevée de la courroie* (*du câble*) *ou d'une attraction magnétique unilatérale entre le rotor et le stator.*

Régler la tension de la courroie ou des câbles de transmission.

Il convient de signaler que la tension est deux fois plus grande dans la transmission par câble que dans celle par courroie et que la tension d'une courroie trapézoïdale est moins élevée que celle d'une courroie ordinaire. De ce fait, les paliers d'une machine prévue pour une transmission par courroie peuvent s'avérer impropres pour le travail avec une transmission par câble.

En plus des paliers, l'arbre de la machine peut, lui aussi, être soumis à une forte surcharge. Dans certains cas, une charge trop grande sur le palier a pour cause un trop petit diamètre de la poulie.

Dans de tels cas, il convient de contacter le représentant du constructeur.

Une attraction magnétique unilatérale est à supprimer par un réglage convenable de l'entrefer entre le stator et le rotor; parfois, pour atteindre ce but, on doit procéder au regarnissage des paliers. Pour le réglage de l'entrefer, se reporter à l'annexe 12.

L. *Poussée axiale sur les paliers provoquée par un déplacement du rotor (voir § 36 et 46) ou par des jeux insuffisants entre les flancs des coussinets et les congés de l'arbre, empêchant une libre dilatation thermique.*

Supprimer le déplacement axial du rotor, assurer des jeux nécessaires entre les flancs des coussinets et les congés de l'arbre (voir annexe 12).

Un échauffement anormal des paliers peut être également provoqué par une forte vibration du rotor.

42-2. L'huile s'échappe d'un palier lisse à lubrification forcée.

A. *Débit d'huile excessif; pression d'huile trop élevée dans la canalisation de refoulement; orifice trop petit pour le passage de l'huile dans la coquille inférieure du coussinet ou dans la tubulure de vidange.*

Régler le débit d'huile, en diminuant l'orifice du diaphragme dans la tubulure de refoulement de manière que la température de l'huile, qui est de 35 à 45 °C à l'entrée, ne dépasse pas 60 à 70 °C à la sortie; réduire la pression d'huile à l'entrée du palier jusqu'à la valeur prescrite par le constructeur (généralement 25 à 50 kPa diff.); augmenter l'orifice pour le retour de l'huile dans la coquille inférieure de coussinet et dans la tubulure de vidange.

Après avoir réglé le débit et la vidange de l'huile, on peut passer à la recherche et à la suppression des autres causes qui peuvent provoquer une fuite d'huile.

B. *Mauvais ajustage ou usure des joints à labyrinthes.*

Ajuster les joints à l'arbre. Lors de la mise en place des joints, prendre des mesures afin d'éviter l'émoussage de leurs arêtes vives. En cas d'usure considérable des joints d'étanchéité, les remplacer.

C. *Suintement de l'huile à travers le joint entre le chapeau et le bâti de palier, ou par le raccord entre les parties supé-*

rieures et inférieures des joints à labyrinthes ou les parties supérieures des écrans réflecteurs d'huile.

Enduire les joints d'une couche de vernis bakélisé ou de blanc. Pour remédier à ce défaut, il est recommandé de pratiquer des rainures *1* collectrices d'huile (fig. 17) tant dans le chapeau que dans le bâti de palier ; les dimensions de la rainure ne doivent pas être inférieures à 8 × 6 mm ; les rainures dans les deux parties doivent coïncider et présenter des

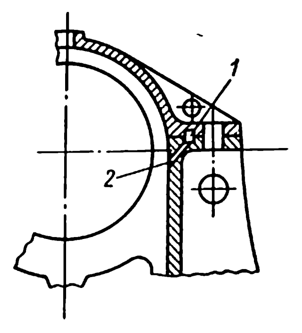


Fig. 17. Rainure *1* collectrice d'huile et orifice *2* de vidange dans le joint entre le couvercle et le bâti de palier

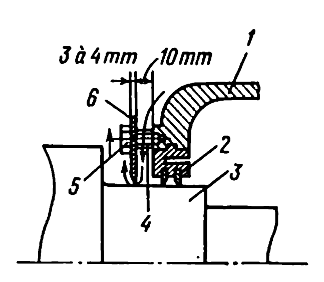


Fig. 18. Joint d'étanchéité complémentaire du palier d'un turbo-alternateur :

1 : palier ; *2* : joint existant ; *3* : arbre ; *4* : tube d'écartement ; *5* : boulon ; *6* : disque en laiton

bords vifs. Dans le bâti de palier, on doit forer des orifices *2* de vidange de 6 à 8 mm de diamètre.

Vérifier l'étanchéité des écrans réflecteurs d'huile.

D. *Nombre insuffisant ou conception défectueuse des joints à labyrinthes.*

Monter des joints à labyrinthes complémentaires ou remplacer les joints utilisés par des joints plus perfectionnés. Les joints à labyrinthes peuvent être installés au besoin de deux côtés du palier.

Le joint complémentaire le plus simple permettant de supprimer la fuite d'huile et l'échappement de vapeur d'huile du palier d'un turbo-alternateur est schématisé par la fig. 18. Il représente un disque en laiton ou en cuivre constitué de deux parties qui sont fixées sur le palier au moyen de boulons avec

tubes d'écartement. En l'absence d'un tel joint d'étanchéité, l'air remplissant l'espace entre le palier et la face frontale de l'épanouissement de l'arbre est animé d'un mouvement de rotation et, étant soumis à l'action d'une force centrifuge se trouve expulsé, en produisant une certaine dépression qui favorise l'infiltration de l'huile et des vapeurs d'huile à travers le joint d'étanchéité existant. Avec un joint d'étanchéité complémentaire

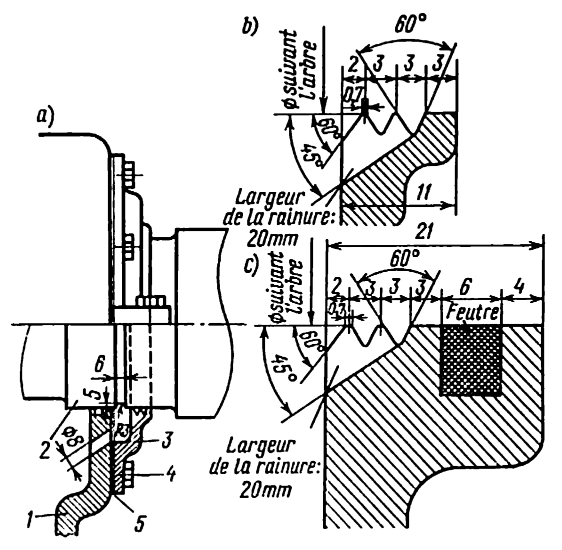


Fig. 19. Etanchement d'un palier:
a: montage du joint d'étanchéité; *b*: dimensions principales du joint; *c*: montage d'une bague en feutre complémentaire.
1 : corps de palier; *2* : arbre; *3* : joint d'étanchéité; *4* : boulon; *5* : garniture d'étanchéité

cet air circule, comme il est montré par des flèches, et n'aspire pas l'huile aux labyrinthes. De plus, les vapeurs d'huile se condensent sur ce joint complémentaire.

Les fig. 19, *a* et *b* montrent un dispositif d'étanchéité plus complexe. Il est coulé en bronze, en laiton ou en un alliage d'aluminium et est rendu démontable suivant le diamètre horizontal. Dans l'arbre de la machine on fraise une rainure qui chasse l'huile tombant sur l'arbre entre le palier

et le dispositif d'étanchéité. Dans la paroi du palier, on fore des trous pour le retour de l'huile dans le palier; pour évacuer l'huile pénétrant dans le dispositif d'étanchéité on fraise dans ce dernier une rainure large de 20 mm. Un tel dispositif peut être amélioré en fraisant dans le joint à labyrinthes une gorge spéciale et en y plaçant une bague d'étanchéité complémentaire en feutre (fig. 19, *c*).

L'emploi de garnitures en feutre est à déconseiller lorsque les vitesses circonférentielles de l'arbre sont

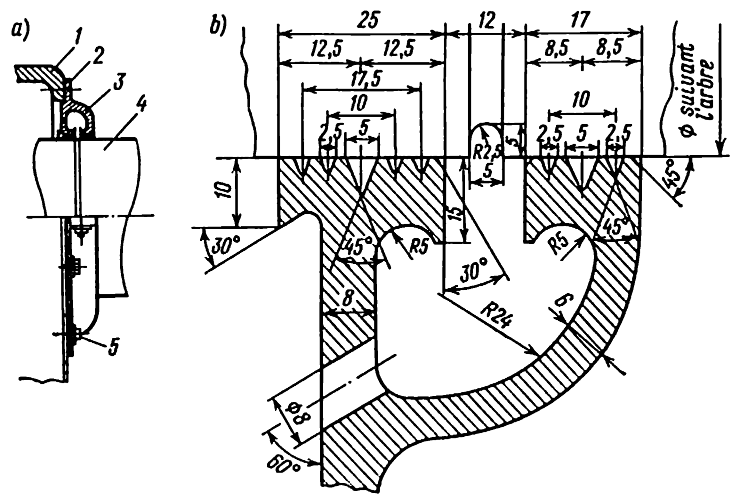


Fig. 20. Joint d'étanchéité en aluminium du palier:
a: montage du joint; *b*: dimensions principales du joint.
1: palier; *2*: garniture d'étanchéité; *3*: joint d'étanchéité; *4*: arbre; *5*: boulon

élevées; la valeur limite de la vitesse circonférentielle permettant l'emploi de garnitures en feutre dépend essentiellement de la qualité d'usinage de la partie frottante de l'arbre. Il faut en effet ne pas perdre de vue que le feutre subit une usure accélérée lorsque la surface de l'arbre est de qualité médiocre et qu'il peut brûler en cas de grandes vitesses circonférentielles. C'est pourquoi les garnitures en feutre ne doivent être utilisées pour des vitesses circonférentielles de l'arbre supérieures à 6 ou 7 m/s, même dans le cas où l'arbre est usiné avec

le plus grand soin. Ces considérations obligent également à veiller à ce que la pression du feutre sur l'arbre ne soit pas trop grande.

Une autre construction, plus perfectionnée, d'un joint à labyrinthes est représentée par la fig. 20. Ce joint est fait en alliage d'aluminium et est rendu démontable suivant le plan axial horizontal. L'arbre possède un collet pare-huile ou une rigole chasse-huile. Actuellement, les joints à labyrinthes de ce type sont largement utilisés dans la construction des machines électriques. Lorsque leur montage est correct et des jeux convenables sont assurés, ces joints permettent d'obtenir une bonne étanchéité.

Quel que soit le type constructif, le jeu entre le joint d'étanchéité et l'arbre doit être de l'ordre de 0,10 à 0,15 mm.

E. *Une pression trop élevée des vapeurs d'huile à l'intérieur du palier favorise l'échappement des vapeurs à travers le jeu entre l'arbre et le joint d'étanchéité.*

Pour pouvoir réduire la pression à l'intérieur du palier et évacuer les vapeurs qui s'y forment, il

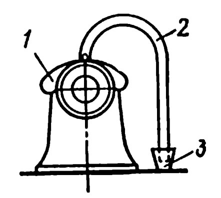


Fig. 21. Evacuation des vapeurs d'huile du palier:
1 : couvercle de palier; *2* : tube recourbé; *3* : récipient

convient de tarauder dans la partie supérieure du couvercle un trou au pas du gaz et d'y visser un tube à gaz (fig. 21) de 12 à 25 mm de diamètre. L'extrémité du tube est recourbée vers le bas et introduite dans un récipient où s'accumule l'huile condensée.

42-3. L'huile s'échappe d'un palier lisse à lubrification par bagues.

A. *Quantité d'huile trop grande*; *niveau d'huile supérieur à celui indiqué sur la jauge ce qui provoque l'écoulement de l'huile le long de l'arbre.*

Ne verser l'huile dans le palier que lorsque la machine est à l'arrêt, étant donné que pendant la rotation le niveau d'huile lu sur la jauge baisse

parce qu'une certaine quantité d'huile est prise par les bagues de graissage.

Juger du niveau d'huile d'après le repère de contrôle marqué sur la jauge à huile dont est muni chaque palier. Si la jauge ne porte pas de repère, verser une quantité d'huile telle que la bague de graissage soit plongée dans l'huile pour 1/4 à 1/5 de son diamètre. Verser l'huile lentement parce que sa viscosité ne permet pas un établissement instantané du niveau.

B. *Orifices trop petits pour le retour de l'huile dans la partie inférieure du coussinet (dans les gorges près du flanc du coussinet).*

Augmenter soit le diamètre des orifices de rotor d'huile, soit leur nombre.

C. *Les parties tournantes de la machine produisent un effet de ventilation trop fort de sorte que l'air est refoulé à travers le palier et chasse de l'huile le long de l'arbre.*

Utiliser des dispositifs d'étanchéité complémentaires. Dans de nombreux cas on peut se borner

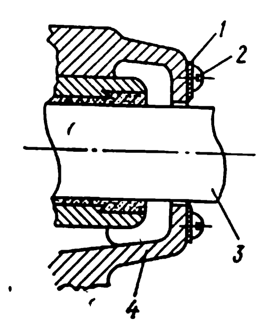


Fig. 22. Etanchement du palier à l'aide d'une rondelle en laiton:

1 : rondelle en laiton; 2 : vis; 3 : arbre; 4 : palier

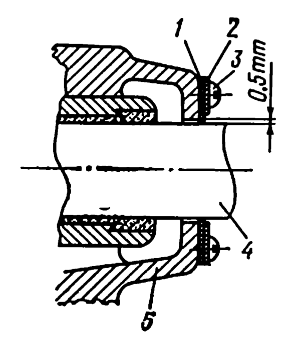


Fig. 23. Etanchement du palier à l'aide d'une rondelle en acier et d'une rondelle en cuir:

1 : rondelle en cuir; 2 : rondelle en acier; 3 : vis; 4 : arbre; 5 : palier

à employer des dispositifs de construction moins complexe que ceux représentés par les fig. 19 et 20. Le joint d'étanchéité le plus simple est représenté sur la fig. 22. Il est constitué par une rondelle en

laiton de 2 mm d'épaisseur qui est vissée sur le corps du palier. Cette rondelle à bord effilé est montée sur l'arbre avec ajustement glissant juste. La fig. 23 montre un joint d'étanchéité réalisé sous la forme d'une rondelle d'acier épaisse de 1 à 2 mm et comportant un jeu de 0,5 mm entre l'arbre et la rondelle. Une rondelle de cuir est interposée entre cette rondelle d'acier et le palier. Au lieu de cette dernière, on peut utiliser une rondelle en feutre avec celle de fixation en cuivre, montée sans jeu entre elle et l'arbre.

42-4. L'huile ou les vapeurs d'huile pénètrent à l'intérieur de la machine.

A. *L'huile ou les vapeurs d'huile sont aspirées dans le palier et envoyées à l'intérieur de la machine par le ventilateur de la machine ou par suite de l'action de ventilation produite par le rotor.*

L'aspiration de l'huile est surtout intense dans les machines fermées à paliers flasques, dans lesquelles une partie des paliers se trouve à l'intérieur de la machine. Dans de telles machines le ventilateur est installé près du palier. Si les joints d'étanchéité présentent des défauts indiqués plus haut, la dépression produite par le fonctionnement du ventilateur provoque une aspiration intense de l'huile à l'intérieur de la machine.

Remédier aux défauts des paliers (voir § 42-2 et 42-3).

B. *L'huile qui s'écoule des paliers supportés par des bâtis situés près du flasque est aspirée à l'intérieur d'une machine fermée le long de son arbre par suite des défauts d'étanchéité entre le flasque et le socle de fondation.*

En plus des joints d'étanchéité décrits plus haut, installer sur le flasque un joint dit à air et représentant une chambre à envelopper l'arbre et à relier par un tube la zone de pression accrue à l'intérieur de la machine.

Actuellement, certains types de machines à grande vitesse, par exemple les turbo-alternateurs, sont munis de tels dispositifs d'étanchéité et le canal servant à amener l'air au dispositif d'étanchéité est aménagé dans les raccords verticaux des flasques du stator sous forme des rainures pratiquées dans les deux parties des flasques.

Le jeu à assurer entre l'arbre et le joint à labyrinthes placé dans le flasque fixé sur la culasse d'une machine fermée doit être de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm.

Pour rendre impossible la pénétration des vapeurs d'huile dans les machines fermées, il est nécessaire d'étancher les raccords entre les parties des flasques du stator ainsi que les raccords entre le socle et les flasques, en utilisant à cet effet le mastic à la litharge ou le mastic au minium. On peut également interposer entre les parties des flasques à raccorder un joint d'étanchéité par exemple du type représenté par la fig. 24 et, entre le socle et les flasques, un

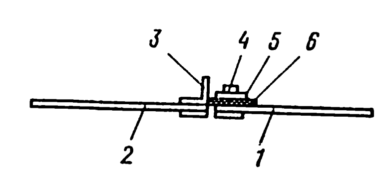


Fig. 24. Joint d'étanchéité entre les parties des flasques de stator:

1 et *2*: parties du flasque; *3*: tronçon de cornière; *4*: vis; *5*: bande d'acier; *6*: feutre

Fig. 25. Dispositif interdisant la pénétration de l'huile à l'intérieur de la machine

1: palier; *2*: vis; *3*: bande d'acier; *4*: feutre; *5*: flasque

joint d'étanchéité analogue à celui schématisé par la fig. 25. L'huile qui tombera sur le socle près du flasque s'accumulera dans la rainure d'où on pourra l'extraire aisément. De plus, dans la partie inférieure du flasque, on prévoit une garniture en feutre sur laquelle on superpose une bande d'acier large de 30 à 40 mm et épaisse de 3 à 4 mm. Cette bande d'acier et le feutre sont vissés sur le flasque.

Signalons que le défaut considéré s'observe surtout dans les turbo-alternateurs d'ancienne construction qui comportent généralement un joint d'étanchéité à air dans le bas du flasque. La pénétration de l'huile à l'intérieur des machines modernes de construction perfectionnée ne s'observe que dans des cas relativement rares.

C. *Pénétration à l'intérieur de la machine des vapeurs d'huile en provenance des autres machines se trouvant dans*

la salle des machines (par exemple des réducteurs reliant les machines électriques à d'autres machines).

Certains processus technologiques, par exemple le laminage à froid de certains aciers, s'accompagnent parfois d'un dégagement de grande quantité des vapeurs d'huile qui peuvent être aspirées par les moteurs électriques d'entraînement se trouvant dans le local de production.

Il convient de rechercher par une observation soigneuse les causes de formation des vapeurs d'huile. Eliminer les défauts constatés dans les paliers de toutes les machines, comme il est indiqué aux § 42-2 et 42-3. Assurer l'étanchéité des corps des réducteurs : éliminer tous les défauts d'étanchéité dans les flasques statoriques et dans les joints à labyrinthes, en se conformant aux prescriptions du § 42-4, B ; installer ou renforcer la ventilation par aspiration dans la salle des machines ou le local de production.

Si les mesures prises ne donnent pas de résultats positifs pour une machine ouverte, il convient de remplacer cette dernière par une machine fermée ou de la transformer en une machine du type fermé, en contactant le représentant du constructeur pour faire des modifications nécessaires.

Bien souvent, dans les cas le plus difficiles, la seule mesure pouvant interdire la pénétration des vapeurs d'huile dans une machine, tant ouverte que fermée, consiste à installer dans un local distinct soit la machine électrique elle-même soit l'autre machine (le réducteur) qui est la source de vapeurs d'huile.

§ 43. Défauts des paliers à roulements

43-1. Le palier chauffe anormalement.

A. *Palier encrassé par la poussière ou par d'autres particules fines ; graisse encrassée.*

Changer la graisse après nettoyage complet et lavage des roulements.

B. *Un excès de graisse dans le palier (surtout dans les machines à grande vitesse) provoque des pertes par frottement élevées.*

Diminuer la quantité de graisse.

C. *Frottement trop élevé entre l'arbre et le bourrage d'étanchéité.*

Vérifier l'installation correcte du bourrage et, s'il y a lieu, diminuer son serrage ou le remplacer.

D. *Les jeux latéraux dans le palier, nécessaires à la compensation de la dilatation thermique de l'arbre, sont nuls*; par exemple, la bague extérieure du roulement bute contre le chapeau de palier ou est montée à frottement trop dur dans le flasque de palier. Dans de tels cas, la poussée axiale sur le palier augmente, ce qui pourra avoir pour conséquence non seulement un échauffement exagéré mais, à plus ou moins longue échéance, la mise hors service de tout le palier. En cas d'un tel défaut, le rotor tourne facilement dans un palier froid mais « grippe » lorsque celui-ci est échauffé.

Régler les jeux latéraux à leur valeur normale (voir annexe 12), soit en interposant des rondelles de réglage entre le chapeau du palier et son corps, soit en procédant au tournage convenable du chapeau du palier. En cas d'emmanchement trop dur de la bague extérieure, il convient de gratter légèrement la surface d'appui dans le palier.

E. *Usure ou destruction des pièces constitutives du palier.*

Remplacer le palier.

F. *Charge trop élevée sur le palier (choix incorrect du palier); courroie de transmission trop tendue.*

Vérifier quel palier est préconisé par le constructeur. Réduire la tension de la courroie.

G. *Montage incorrect du palier*; *mauvais alignement de la machine électrique avec la machine entraînée ou celle d'entraînement.*

Vérifier le montage du palier et le centrage des machines (voir annexe 13).

43-2. On constate la projection de la graisse du palier.

A. *Graissage trop abondant du palier.*

Diminuer la quantité de graisse.

B. *Graisse non appropriée, à point de goutte trop bas.*

Vérifier si la qualité de graisse est conforme à celle préconisée par le constructeur et, s'il y a lieu, la changer en utilisant pour remplir le palier une graisse à point de goutte plus haut. Pour le choix de la qualité de graisse, se reporter à l'annexe 15.

C. *Usure ou conception défectueuse des dispositifs d'étanchéité.*

Changer l'élément d'étanchéité ou remplacer tout le dispositif d'étanchéité par un dispositif plus perfectionné (par exemple, du type de celui de la fig. 19, *c*).

43-3. Le palier fait un fort bruit anormal qui s'accompagne souvent d'une élévation de la température du palier.

A. *Palier encrassé.*

Changer la graisse après nettoyage complet et lavage au pétrole des roulements.

B. *Frottement de la cage du roulement sur les pièces conjuguées au palier.*

Ouvrir le roulement et supprimer le frottement.

C. *Usure excessive du roulement, effritement des chemins et des corps de roulement.*

Ouvrir le roulement, vérifier les jeux entre les corps de roulement et la bague extérieure (voir annexe 12), examiner les chemins et les corps de roulement. En cas d'une usure exagérée ou d'une détérioration, remplacer le roulement.

D. *Défauts des machines accouplées à la machine électrique ou ceux de l'accouplement produisant des coups et secousses; mauvais centrage des machines.*

Vérifier tous les organes du groupe, supprimer les défauts constatés, vérifier le centrage (voir annexe 13).

E. *Emmanchement trop faible de la bague intérieure du roulement sur l'arbre.*

Remplacer par un roulement à diamètre intérieur plus petit après tournage préalable de l'arbre.

§ 44. Vibrations des machines

Les vibrations des machines électriques sont provoquées soit par un mauvais équilibrage des parties tournantes et des défectuosités mécaniques soit par des causes de nature électromagnétique. Quelques procédés permettant de rechercher les causes des vibrations sont décrits au § 44-3. Les limites admissibles des vibrations sont indiquées dans l'annexe 12.

44-1. Parties tournantes mal équilibrées.

A. *Rotor mal équilibré, balourd dans le plateau d'accouplement ou dans la poulie.*

Procéder à un nouveau équilibrage du rotor (voir annexe 14). Déposer les grandes poulies ou les plateaux (s'ils sont utilisés), qui peuvent être cause des vibrations, et procéder à leur équilibrage, séparément du rotor. Equilibrer dynamiquement les volants complémentaires, utilisés par exemple dans les groupes générateurs à moteur diesel.

B. *Le bobinage rotorique d'une machine qui a normalement fonctionné pendant quelque temps s'est déplacé par suite du mauvais serrage ou du faible frettage (surtout dans les machines à grande vitesse)* ainsi qu'à cause d'une forte élévation de la vitesse de rotation due par exemple à un défaut du régulateur du moteur d'entraînement.

Si le déplacement du bobinage n'est plus observé au cours du fonctionnement ultérieur, la vibration de la machine peut être supprimée par un nouveau équilibrage du rotor (voir annexe 14). Dans le cas où les bobinages continuent à se déplacer après l'équilibrage complémentaire et la machine continue à vibrer, il faut déposer les frettes, consolider les bobinages et mettre des frettes plus solides.

B. *Fixation affaiblie de l'enroulement rotorique par suite d'un retrait de séchage de l'isolation.* Ce défaut se produit le plus souvent dans les bobines inductrices des machines synchrones à pôles saillants.

Assurer une bonne fixation de l'enroulement par interposition de l'isolation complémentaire, un bon sertissage et un serrage énergique. Les procédés de fixation de l'enroulement dépendent du type constructif de la machine. La consolidation de l'enroulement exige presque toujours de procéder à un équilibrage complémentaire du rotor (voir annexe 14).

44-2. Défauts mécaniques.

A. *Mauvais centrage d'un groupe comprenant plusieurs machines.* Il faut ne pas perdre de vue que certains groupes parfaitement alignés à froid peuvent présenter en marche des défauts d'alignement à la suite d'une déformation des supports, des fondations, etc. (voir annexe 13).

Vérifier et, s'il y a lieu, corriger le centrage des arbres (voir annexe 13).

B. *Fixation affaiblie sur l'arbre des parties tournantes par exemple du rotor, de la poulie, du volant, etc. Tension*

insuffisante ou ajustement faible des frettes sur le tambour de rotor ou sur la bague de centrage dans un turbo-alternateur, ainsi que de la bague de centrage sur l'arbre. Les symptômes d'un tel défaut sont : l'apparition d'une corrosion par contact (traces de rouille sur les surfaces d'appui), l'augmentation de la vibration avec le temps. Ce dernier phénomène s'explique par la progression du défaut.

Dans le cas des machines de petite puissance à vitesse relativement faible, on peut remédier à ce défaut par une mise plus serrée de la clavette conique, si celle-ci est prévue par la construction.

Une méthode plus efficace consiste à aléser le rotor, la poulie, etc., à recharger par soudage une couche d'acier et à usiner avec des tolérances assurant l'ajustement nécessaire sur l'arbre. Dans certains cas, on peut monter, après le réalésage, une douille intermédiaire. Dans des cas compliqués, il faut consulter le représentant du constructeur pour faire modifier les usinages.

C. *Défauts dans les trains d'engrenages dus à un engrènement incorrect, à un mauvais usinage des dents, etc.*

Réparer ou remplacer le couple d'engrenages.

D. *Surépaisseurs sur des câbles de commande et des courroies de transmission dues à une mauvaise exécution des jonctions ; heurts des coutures sur la poulie dus à une disposition incorrecte des coutures par rapport au sens de rotation de la poulie.*

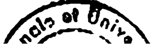
Améliorer les jonctions sur les câbles ou courroies, disposer des coutures de manière à éviter leurs heurts contre la poulie.

E. *Frottement sur l'arbre des joints à labyrinthes ou des bagues collectrices d'huile.*

Ajuster à l'arbre les joints d'étanchéité ou les bagues, en assurant des jeux préconisés par le constructeur.

F. *Manchon d'accouplement défectueux. Non-parallélisme des demi-accouplements dû à leur montage incorrect sur l'arbre. Battement d'un ou des deux demi-accouplements. Mauvais montage ou usure exagérée des broches dans l'accouplement à broches. Usure inégale ou corrosion des dents ou des creux dans les manchons à griffes.*

Vérifier le montage correct et le battement des deux plateaux du manchon d'accouplement (voir



annexe 12); vérifier le montage des broches dans les demi-accouplements. Supprimer, au besoin, le battement anormal des demi-accouplements, corriger le montage des broches ou les remplacer (parfois, il suffit de permuter les broches ou simplement de les tourner dans leurs logements); réparer le manchon à griffes.

G. *Ovalisation des tourillons de l'arbre; arbre faussé.*

Vérifier le battement de l'arbre et de ses tourillons (voir annexe 12). Supprimer l'ovalisation des tourillons par leur tournage ou rectification. Remédier au gauchissement de l'arbre en lui faisant subir un dressage spécial (par un procédé mécanique ou thermique).

H. *Jeu trop faible ou exagéré entre les tourillons de l'arbre et les coussinets.*

Assurer entre les tourillons et les coussinets les jeux prescrits par le constructeur, si les prescriptions du constructeur manquent, agir comme il est indiqué dans la section B de l'annexe 12.

Vérifier que la conjugaison du coussinet au corps du palier correspond au dessin d'exécution, vu qu'un jeu exagéré (supérieur à 0,05 mm) entre le coussinet et le couvercle du palier peut causer une vibration anormale du palier même dans le cas où le jeu dans le coussinet a sa valeur normale.

I. *« Battement par huile » des machines à grande vitesse dû à un choix incorrect du jeu entre le tourillon de l'arbre et le coussinet* [14]. Dans ce cas, l'arbre se trouve soulevé par des forces hydrodynamiques qui prennent naissance dans le coin d'huile agissant entre l'arbre et le coussinet et se déplace sur un chemin fermé dans le sens de sa rotation. Ce phénomène se répète périodiquement. Le nombre de vibrations qui en résultent ne coïncide pas avec le nombre de tours du rotor, il est généralement inférieur à la moitié de celui-ci. L'intensité de ces vibrations dépend de la vitesse de rotation de l'arbre, du jeu dans le coussinet, de la masse et de la flexibilité du rotor, du déséquilibre, même minime, de ce dernier, de la viscosité de l'huile et donc de la température de l'huile et des paliers puisque la viscosité en dépend fortement. C'est pourquoi, si l'élévation de la température d'huile fait diminuer ou même disparaître complètement les vibrations, on peut conclure avec toute certitude que les

vibrations anormales de la machine proviennent d'un choix incorrect du jeu entre le tourillon et le coussinet.

Augmenter par grattage les jeux latéraux dans le coussinet jusqu'à sa partie ajustée en vue d'élargir le coin d'huile.

J. *Température trop basse de l'huile entrant dans le palier en cas de graissage forcé.*

Veiller à ce qu'avant la mise en route de la machine la température de l'huile à l'entrée du palier ne soit pas inférieure à 30 °C. Pendant la marche de la machine, la température de l'huile entrante doit être de l'ordre de 35 à 40 °C.

K. *Rigidité insuffisante des bâtis de paliers, du socle de fondation, de l'ensemble de fondation ou de ses parties.* Des phénomènes de résonance peuvent apparaître.

Le seul remède consiste à faire modifier la construction. Au préalable, il convient de s'assurer que les vibrations ne sont pas imputables à d'autres causes. Consulter le représentant du constructeur.

L. *Mauvaise fixation de la machine sur son socle*; *desserrage des boulons d'ancrage ou des boulons de fixation des bâtis de paliers sur le socle*; *disposition incorrecte ou nombre insuffisant des cales de montage entre le socle et la fondation*; *mauvais scellement du socle.*

Vérifier le bon serrage des boulons d'ancrage et des boulons de fixation des bâtis de paliers; vérifier le montage de la machine. Poser, au besoin, des cales complémentaires et couler le socle avec un mortier de ciment convenable.

M. *Vibrations transmises, en cas d'accouplement rigide, par la machine motrice ou la machine entraînée* (par exemple, par la turbine à vapeur, le moteur à combustion interne ou par l'organe entraîné, tel que le compresseur, le ventilateur, etc.).

Rechercher et éliminer les causes de vibration des autres machines faisant partie du groupe.

Vérifier l'alignement des arbres et l'état des manchons d'accouplement; s'il y a lieu, équilibrer dynamiquement les rotors des autres machines.

Si les causes qui provoquent les vibrations du groupe de machines sont difficiles à rechercher, il convient de désaccoupler les machines et de faire fonctionner la machine électrique en moteur à vide.

Le fonctionnement normal de la machine sera l'indice que les vibrations doivent être incriminées à d'autres organes.

N. *Vibrations de l'assise de la machine électrique, transmises par des machines voisines à travers des liaisons de construction entre l'assise de la machine et les assises des autres machines, les murs du bâtiment et le plancher de la salle des machines.*

Reconstruire les fondations.

O. *Un affaissement inégal des fondations a modifié le montage correct et l'alignement des machines.*

Vérifier le montage et l'alignement des machines (voir annexe 13).

P. *Machine en résonance avec son assise.* Si la fréquence des oscillations propres de l'assise coïncide avec celle des oscillations mécaniques de la machine (du groupe), les vibrations de la machine ne se produisent que pour une vitesse de rotation déterminée et elles sont surtout nuisibles lorsque cette vitesse est la vitesse nominale de la machine.

Les oscillations propres de l'assise peuvent être déterminées en procédant comme suit: installer sur l'assise un petit moteur à courant continu permettant le réglage de la vitesse dans des limites aussi larges que possible et le faire tourner à des vitesses différentes. Au préalable, placer sur son rotor une petite masse pour provoquer un déséquilibre artificiel. Si l'assise commence à vibrer plus fortement lorsque le moteur tourne à la vitesse nominale du groupe de machines c'est l'indice que les vibrations du groupe proviennent de sa résonance avec l'assise.

Equilibrer avec le plus grand soin le rotor et renforcer la rigidité de l'assise. Dans le cas où de grandes vibrations se produisent pour une vitesse de rotation se trouvant au-dessous de la gamme de vitesses de travail, il convient, lors de la mise en marche de la machine, de dépasser le plus vite possible la vitesse pour laquelle se manifestent des vibrations accrues.

Q. *Certaines parties de la machine entrent en résonance lorsque la fréquence de leurs oscillations propres coïncide avec la fréquence de rotation du rotor.* Ces phénomènes peuvent s'observer dans les flasques de paliers, les bâtis de paliers,

les flasques statoriques, le socle, la couronne porte-balais et autres organes.

Modifier la rigidité des organes entrant en résonance par une modification de la construction en soudant, par exemple, des nervures de raidissement.

R. *Dans certaines grosses machines à courant continu, la couronne porte-balais commence parfois à vibrer soudainement, en provoquant de forts crachements au collecteur pouvant aller jusqu'aux « flash »*. Ce phénomène a pour cause un état instable de la force de frottement entre le collecteur et les balais de qualité donnée. Une variation du coefficient de frottement due par exemple à une variation de la température et de l'humidité de l'air ambiant ou à une variation de charge, etc. a pour conséquence une variation correspondante de la fréquence des oscillations des porte-balais; ces dernières peuvent provoquer des vibrations de résonance de la couronne porte-balais.

Les vibrations ayant pour origine la cause susindiquée peuvent être temporairement supprimées si l'on enduit légèrement avec de la paraffine la surface du collecteur (en passant un morceau de paraffine sur la génératrice du collecteur) : les conditions de frottement s'en trouvent brusquement modifiées et les vibrations s'évanouissent. Un remède efficace consiste à choisir des balais de qualité convenable.

S. *La fréquence des oscillations forcées coïncide, à la vitesse de rotation nominale du rotor de la machine, avec la fréquence des oscillations propres du système rotor-supports.* Une telle coïncidence peut avoir lieu en cas d'un mauvais calcul du rotor.

Consulter le représentant du constructeur.

T. *La rigidité du rotor d'un turbo-alternateur n'est pas la même suivant ses deux axes.* Les vibrations dues à cette cause se produisent parfois dans les gros turbo-alternateurs bipolaires. Les rigidités différentes du rotor s'expliquent par la présence de grandes dents (fig. 26). La flèche du rotor est minimale lorsque l'axe des grandes dents est disposé verticalement et maximale au cas où il est horizontal. Il en résulte que pendant un tour, la flèche statique du rotor subit deux cycles complets de variation c'est-à-dire que la rotation du rotor s'accompagne d'une vibration dont la fréquence est le double de la fréquence de rotation.

Une telle vibration ne peut être supprimée qu'au moyen des modifications constructives du rotor ce qui ne peut pas être réalisé au cours d'utilisation de la machine. Or, l'expérience montre que grâce

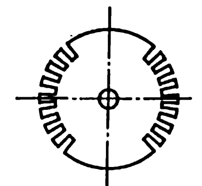


Fig. 26. Section transversale du rotor d'un turbo-alternateur

à des dispositions constructives prises par les constructeurs, l'intensité de ces vibrations reste le plus souvent dans les limites admissibles.

44-3. Apparition de phénomènes électromagnétiques anormaux.

A. *Erreur de couplage dans l'enroulement statorique d'une machine à courant alternatif.*

Voir § 16-12, A.

B. *Court-circuit dans le rotor bobiné d'un moteur asynchrone. Vibrations de la machine à la fréquence de glissement.*

Voir § 14-3.

C. *Court-circuit entre spires ou mise à la masse en deux points de l'enroulement d'excitation d'une machine synchrone.*

Voir § 25-1, C.

D. *Bobines inductrices des machines synchrones mal couplées entre elles.*

Vérifier la polarité des pôles et assurer des connexions correctes (voir annexe 2).

E. *Rupture dans les tiges du rotor d'un moteur asynchrone à cage.*

Voir § 14-2, F.

F. *Rupture dans les tiges d'amortissement des machines synchrones (se manifeste surtout lors de la marche en charge du moteur).*

Voir § 14-2, F.

G. *Déformation ou battement du fer de rotor (d'induit) provoquant : une variation continue de la longueur de l'entrefer entre le rotor et le stator lors de la rotation du rotor, une asymétrie du flux magnétique dans l'entrefer, l'apparition d'une force tournante d'attraction unilatérale entre le rotor et le*

stator qui amène un gauchissement de l'arbre ou des mouvements vibratoires du stator si sa construction n'est pas suffisamment rigide. Dans les moteurs asynchrones, où l'entrefer est relativement petit, le rotor peut frotter sur le stator.

Rectifier le rotor (l'induit) au tour ou à l'aide d'une meule abrasive. On ne devra pas perdre de vue que l'augmentation de l'entrefer dans un moteur asynchrone compromet son facteur de puissance.

H. *Vibrations d'un moteur asynchrone par suite d'un choix défavorable du nombre de dents du stator et du rotor.*

Voir § 18-3.

I. *Inégalité trop grande de la longueur de l'entrefer entre le rotor et le stator.* Les vibrations qui en résultent se produisent à la double fréquence de rotation. L'inégalité de l'entrefer, si elle se trouve dans les limites indiquées dans l'annexe 12 ne peut pas provoquer de vibrations.

Régler la longueur de l'entrefer entre le rotor et le stator (voir annexe 12).

J. *La carcasse d'un gros turbo-alternateur vibre du fait que les forces électromagnétiques appliquées au stator serrent*

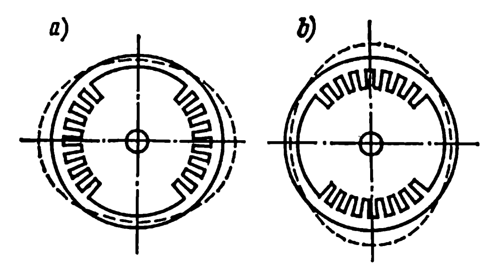


Fig. 27. Explication des causes provoquant des vibrations à la double fréquence de rotation

l'anneau de fer actif suivant l'axe des pôles, en provoquant son ellipticité.

Ce défaut se produit si la carcasse du stator n'est pas suffisamment rigide. Dans ces conditions, le diamètre de l'alésage diminue le long de l'axe des pôles (l'axe des grandes dents) et augmente suivant l'axe transversal. La fig. 27, *a* montre une section du rotor pour la position verticale et la fig. 27, *b* pour la position horizontale de l'axe des pôles. Pendant un tour complet d'un rotor bipolaire, le

déplacement radial de chaque point sur la face interne du stator effectue deux cycles complets ce qui signifie que chaque point vibre à la double fréquence de rotation du rotor.

Les vibrations de ce type ne peuvent être réduites qu'au prix de modifications constructives.

K. *Charge trop déséquilibrée d'un turbo-alternateur.*

Réduire le déséquilibre jusqu'à des limites admissibles (voir § 27-4).

Dans bien des cas on peut facilement déterminer si les vibrations sont dues à une charge déséquilibrée, à une défectuosité mécanique ou à l'apparition de phénomènes électromagnétiques anormaux. Considérons, à titre d'exemple, l'un des procédés permettant de rechercher la cause réelle des vibrations anormales d'un moteur ou d'un générateur.

Dans le cas d'un moteur, on le débranche du réseau d'alimentation et on vérifie sa vibration à l'instant où sa vitesse de rotation n'a pas eu le temps de s'abaisser d'une façon plus ou moins notable. Dans le cas d'un alternateur, on l'excite jusqu'à la tension nominale pour la vitesse de rotation nominale. Si les vibrations disparaissent lorsque le moteur est débranché du réseau ou l'alternateur est désexcité, on peut conclure qu'à l'origine de ces vibrations sont des phénomènes électromagnétiques.

Bien souvent, la détermination de la fréquence des vibrations permet aussi de rechercher leurs causes. L'ovalisation des tourillons de l'arbre provoque une vibration à la double fréquence de rotation. Si les vibrations sont dues au « battement par huile » (voir § 44-2, I), leur fréquence est inférieure à la moitié de la fréquence de rotation. Des déséquilibres dans les pièces tournantes entraînent des vibrations à la fréquence de rotation.

§ 45. Bruits anormaux des machines

45-1. Le fer actif est desserré, ce qui se décèle d'après les vibrations considérables de la carcasse et du dos de stator ainsi que d'après un bruit caractéristique que la machine en marche fait entendre. Les pulsations du flux magnétique entraînent une vibration des tôles de fer actif et un dévelop-

pement intense de la corrosion par contact qui se manifeste par la présence de traces de corrosion sous forme de poudre fine.

Un desserrage général du fer actif exige de procéder à son nouveau empilage. En cas de desserrages locaux, tous les endroits affaiblis sont resserrés par l'enfoncement de cales de guétinax ou de cales en carton bakélisé.

45-2. **Bobinages détériorés ou en mauvais état; répartition asymétrique des groupes de bobines en cas d'emploi de plusieurs voies d'enroulement.**

Voir §§ 13-2, 16-12, A, 18-1, C et 18-2.

45-3. **Vibration de toute la machine ou de certaines parties.**

Voir § 44 et annexe 14.

45-4. **Mauvaises conditions d'amenée d'air dans les canaux de ventilation des machines à grande vitesse et fortement ventilées,** par exemple, présence de bords vifs, de courbures et de brusques variations de la section des canaux de ventilation. Les oscillations acoustiques peuvent également avoir pour cause les vibrations de l'air dans des espaces vides, fentes ou canaux (comme dans le cas d'une sirène).

Le bruit dû à la ventilation peut être réduit par des dispositions constructives convenables dont la réalisation exige de procéder à une réfection de la machine et d'employer par exemple des ventilateurs et des flasques de construction spéciale permettant de diminuer la formation de tourbillons. Il faut consulter le représentant du constructeur.

45-5. **Vibration des entretoises d'écartement dans les paquets de fer; vibration des tôles de fer extrêmes; gonflement ou desserrage des cales d'encoches; isolants en saillie (décollage du ruban, détachement du carton isolant, etc.).**

La vibration des entretoises d'écartement et des tôles magnétiques extrêmes peut être supprimée par leur serrage à l'aide de cales en guétinax ou en textolite. Des cales gonflées sont à réduire par rabotage ou sciage ; des cales affaiblies sont à remplacer, les isolants émergeants sont à couper.

45-6. **Défauts des paliers à roulements.**

Voir § 43.

45-7. **Choix d'un nombre défavorable d'encoches du stator et du rotor des moteurs asynchrones.**

Voir § 18-3.

§ 46. Déplacement axial et battements latéraux d'un rotor

Le déplacement axial et les battements latéraux d'un rotor (d'un induit) s'observent le plus souvent en cas d'emploi de manchons d'accouplement élastique. Lorsque les machines sont à accouplement rigide, les déplacements axiaux de l'arbre de l'une des machines sont empêchés par l'autre machine.

46-1. Déplacement du rotor (de l'induit) vers l'un des paliers. Lors de l'excitation d'un générateur en rotation ou lors de la mise en marche d'un moteur, leur rotor (induit) se déplace, de façon stable, vers l'un des paliers et ce déplacement subsiste en marche à vide et en charge. Quand le

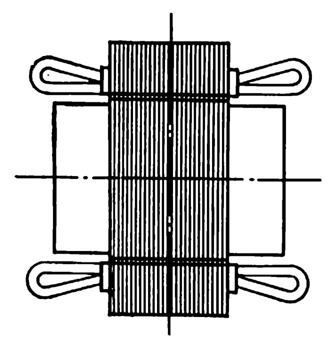


Fig. 28. Coïncidence des axes magnétiques du stator et du rotor

générateur tourne à l'état non excité ou le moteur tourne par inertie, leur rotor présente un débattement (jeu) normal dans les deux sens.

Non-coïncidence des axes magnétiques du stator (de l'inducteur) et du rotor (de l'induit) par suite d'un montage incorrect du stator (de l'inducteur).

Amener le stator (l'inducteur) dans une position telle que le jeu axial du rotor (de l'induit) soit le même dans les deux sens aussi bien en marche à vide qu'en marche en charge du générateur et du moteur. Une telle position correspond à la coïncidence de l'axe magnétique du stator avec l'axe magnétique du rotor (fig. 28). A cet effet, il convient de déplacer le stator (l'inducteur) dans le sens opposé au déplacement du rotor (de l'induit).

46-2. Le déplacement axial du rotor (de l'induit) apparaît après une certaine période de fonctionnement normal de la

machine. Le déplacementi du rotor (de l'induit) n'est ni constant ni permanent : parfois, il augmente ou diminue, parfois, il disparaît complètement, pour réapparaître plus tard. Dans certains cas, on constate des battements latéraux du rotor (de l'induit) qui augmentent avec diminution de la charge et atteignent leur maximum en marche à vide de l'alternateur ou lors de la rotation du rotor après l'arrêt du moteur, c'est-à-dire en l'absence de forces électromagnétiques appliquées au rotor (à l'induit).

A. *Défaut d'alignement des machines accouplées par suite d'un affaissement irrégulier de la fondation, d'une usure des paliers, etc.*

Vérifier et corriger l'alignement des machines accouplées (voir annexe 13).

Réparer les paliers et assurer des jeux normaux entre les tourillons de l'arbre et les coussinets (voir annexe 12).

B. *Usure inégale des parties en contact dans les accouplements à griffes, à broches ou à ressorts. Lubrification insuffisante. Corrosion, grippage des parties en contact des plateaux ;*

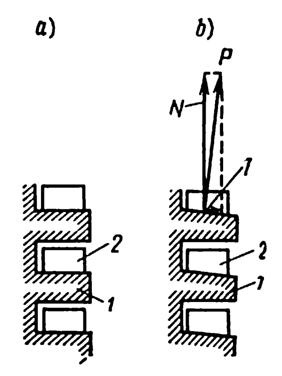


Fig. 29. Positions relatives des surfaces de travail des dents des pignons entraîneurs et des manchons :
a : dans les conditions normales ; *b* : lorsque les surfaces de travail sont biseautées.
1 : dent du manchon ; *2* : dent du pignon entraîneur

traces de cour, bavures sur les surfaces de travail des accouplements à griffes et à ressorts.

Toutes ces défectuosités entraînent un effort axial qui fait déplacer le rotor. C'est ainsi que l'usure inégale des surfaces de travail d'un accouplement à griffes amène un biseautage de ces surfaces qui cessent d'être parallèles à l'axe de rotation (fig. 29). Dans ce cas, la force P qui s'applique entre les deux demi-accouplements ne sera plus perpendiculaire à l'axe de rotation. Elle peut être décomposée en deux

composantes N et T, dont la première sera perpendiculaire à l'axe de rotation et la seconde parallèle à cet axe. C'est la force T qui provoque un déplacement axial du rotor.

Nettoyer soigneusement les parties en contact des demi-accouplements des traces de rouille, éliminer les matages et les bavures. Ajuster les dents dans l'accouplement à griffes. En cas d'une usure anormale des dents d'un accouplement à ressorts, ce dernier est à remplacer.

Il convient de remarquer que le déplacement axial et les battements latéraux du rotor (de l'induit) d'une machine électrique peuvent être également provoqués par des défauts dans le moteur d'entraînement ou dans l'organe entraîné. En cas de doute, pour pouvoir établir la vraie cause de défaut, il convient de désaccoupler les machines et de mettre en marche la seule machine électrique. Si la machine électrique fonctionne normalement, c'est l'indice que la cause de déplacement du rotor (de l'induit) doit être recherchée en dehors d'elle.

Dans le cas où le déplacement du rotor (de l'induit) résulte d'une non-coïncidence des axes magnétiques du stator et du rotor (de l'induit), il sera observé aussi lors du fonctionnement de la machine électrique seule.

Pour les causes de déplacement axial du rotor d'un turbo-alternateur se reporter au § 36.

§ 47. Défauts des réfrigérants d'air

47-1. Obstruction du réfrigérant d'air se produisant même en cas d'emploi d'un filtre parce que ce dernier n'assure pratiquement pas une purification totale de l'eau de refroidissement.

A. *Diminution de la section des tubes par suite de divers dépôts sur leurs parois.* L'augmentation de l'écart de température entre l'eau et les parois des tubes qui en résulte compromet le bon fonctionnement du réfrigérant.

Un tel défaut entraîne un échauffement élevé de l'eau dans le réfrigérant (pour une charge déterminée de la machine), une diminution du débit d'eau et une augmentation de la différence de température entre l'air refroidi et l'eau froide arrivant dans le réfrigérant.

L'indice le plus significatif témoignant de l'obstruction du réfrigérant d'air est une augmentation de la différence de température entre l'eau sortante et l'eau entrante [15]. Cela tient à ce que l'obstruction du réfrigérant d'air est parfois accompagnée aussi de l'obstruction de la rondelle de mesure du compteur d'eau de sorte que ce dernier peut ne pas modifier ses indications malgré un débit d'eau plus faible; une augmentation de la différence de température entre l'air refroidi et l'eau froide peut être également constatée en cas d'autres défauts, par exemple, en cas d'une corrosion extérieure du réfrigérant (voir § 47-3).

Nettoyer le réfrigérant, après avoir ôté ses deux couvercles. Enlever les dépôts aux tubes, en les lavant à une faible solution d'acide chlorhydrique. Eliminer des dépôts organiques à l'aide de brosses spéciales (goupillons).

Pour localiser la section obstruée d'un réfrigérant à plusieurs sections, il convient, avant de procéder à son nettoyage, de mesurer et de comparer, pour chacune des sections, la différence de température entre l'eau entrante et l'eau sortante.

47-2. Le réfrigérant d'air se couvre de buée (le plus généralement, en hiver), parce que le point de rosée de l'air (la température à laquelle l'air est saturé de vapeur d'eau) qui passe à travers le réfrigérant se trouve supérieur à la température des tubes, des rondelles et de la spirale en fil enroulée sur les tubes du réfrigérant. Dans ces conditions, l'humidité condensée peut être entraînée par le courant d'air à l'intérieur de la machine, ce qui pourra présenter un danger surtout pour les connexions de sortie des enroulements à haute tension parce qu'un amorçage entre les sorties sur une surface humide peut provoquer à la longue leur mise en court-circuit. En outre, la buée favorise la corrosion des rondelles du réfrigérant (voir § 47-3).

A. *La température de l'eau à l'entrée du réfrigérant est devenue inférieure à la température de rosée de l'air à refroidir.*

Elever la température de l'eau admise dans le réfrigérant d'air, en renvoyant dans le réfrigérant une partie d'eau échauffée. Dans le cas des turbo-alternateurs, la température de l'eau dans les réfrigérants peut être augmentée grâce à l'adjonction de l'eau plus chaude en provenance des condenseurs des turbines.

B. *Une quantité importante d'air plus humide est aspirée, par suite des défauts d'étanchéité, de la salle des machines dans le système de refroidissement de la machine.*

Assurer une bonne étanchéité de tous les joints de la machine (voir fig. 24 et 25) et de tous les joints du système de refroidissement. Si le système de refroidissement comporte un filtre complémentaire, à bain d'huile, servant à compenser les fuites d'air et placé dans la région de dépression (au-dessous de la machine), il est nécessaire de veiller à ce que l'air aspiré par ce filtre soit pris à l'extérieur et non dans la salle des machines. C'est seulement à cette condition que la température de l'air aspiré dans le circuit de refroidissement de la machine sera inférieure à la température de l'eau admise dans le réfrigérant (on a en vue la période d'hiver pendant laquelle on observe pratiquement la formation de buée).

Quand l'étanchéité du système de refroidissement est suffisamment bonne, l'emploi d'un tel filtre complémentaire permet d'éviter complètement la formation, sur le réfrigérant d'air, de la buée imputable à la cause considérée.

Une diminution du débit d'eau admise dans le réfrigérant n'est pas un moyen sûr pour éviter la formation de buée parce qu'une telle mesure ne peut que réduire le volume du réfrigérant capable de condenser les vapeurs d'eau ; les premières rangées de tubes se trouvant en contact avec l'air échauffé continueront à condenser de la vapeur d'eau et seront donc couvertes de buée.

Pour empêcher l'accumulation de l'eau en cas de formation de buée sur le réfrigérant d'air il convient de prévoir dans le fond de la chambre d'air froid un tube d'écoulement muni d'une fermeture hydraulique.

47-3. Le réfrigérant d'air est corrodé.

A. *Une corrosion extérieure n'apparaît que sur des réfrigérants d'air d'ancienne construction utilisant des rondelles d'acier étamées, soudées sur les tubes en laiton.* Les traces de corrosion sont constatées sur des surfaces mal étamées, lorsque le réfrigérant d'air est couvert de buée (voir § 47-2). Une corrosion importante a pour conséquence une différence de température plus accentuée entre l'air refroidi et l'eau

froide et donc une brusque baisse de l'efficacité du réfrigérant. Les réfrigérants modernes, constitués par des tubes portant des spirales en fil de cuivre soudées, sont sensiblement plus résistants à la corrosion extérieure.

Prendre des mesures en vue d'empêcher la formation de buée sur les réfrigérants d'air (voir § 47-2).

B. *Traces de corrosion sur les surfaces intérieures des tubes et des plaques tubulaires dues essentiellement à des phénomènes électrochimiques.*

On peut recommander l'emploi de dispositifs dits protecteurs auxquels on fait subir l'effet destructeur pour éviter la destruction des pièces principales. Les protecteurs sont placés sous les couvercles du réfrigérant, dans les chambres d'eau, de chaque côté, et doivent être mis en contact avec les plaques tubulaires. Au fur et à mesure que ces protecteurs sont détruits par la corrosion, on doit les remplacer. Pour toutes les questions relatives à l'emploi de protecteurs, il faut consulter le représentant du constructeur.

47-4. Il y a une fuite dans le réfrigérant d'air.

A. *Fuite d'eau aux endroits de mandrinage des tubes dans les plaques tubulaires ayant pour causes des défauts d'étanchéité, une pression trop élevée dans la canalisation de refoulement d'eau et des variations brusques de température de l'eau de refroidissement.*

Procéder au mandrinage supplémentaire des tubes. Assurer dans la canalisation de refoulement d'eau la pression normale préconisée par le constructeur (en général, non supérieure à 0,2 MPa), éviter des variations brusques de température de l'eau de refroidissement.

B. *Destruction des tubes du réfrigérant d'air par suite des dégradations mécaniques, des coups de bélier, de la corrosion (voir § 47-3) ainsi que des phénomènes de fatigue du métal des tubes due à leurs vibrations.* La résistance à la fatigue du métal des tubes est sensiblement plus faible dans un milieu corrosif que dans un milieu normal. C'est pourquoi, la présence dans l'eau de refroidissement d'impuretés agressives par exemple du chlore, peut entraîner, même dans le cas de faibles contraintes mécaniques la formation de fissures et la cassure des tubes.

En cas de vibration des tubes, assurer leur fixation supplémentaire. En cas de destruction des tubes, envoyer l'eau de refroidissement à l'analyse chimique et s'il s'avère qu'elle contient des impuretés agressives, assurer l'alimentation des réfrigérants avec de l'eau chimiquement épurée.

Un tube avarié peut être isolé du circuit de refroidissement par fermeture de ses deux extrémités au moyen de bouchons obturateurs.

47-5. Le fonctionnement du réfrigérant d'air est devenu moins bon au cours d'utilisation et notamment, toutes autres circonstances restant inchangées, la différence de température entre l'air refroidi et l'eau froide est devenue plus grande.

A. Voir § 47-1.

B. *Rondelles du réfrigérant d'air corrodées.*

Voir § 47-3.

C. *Réduction considérable du nombre de tubes en service, les autres étant bouchés pour supprimer les fuites.*

Il est nécessaire de soumettre le réfrigérant d'air à une révision générale.

47-6. Le fonctionnement d'un réfrigérant d'air nouvellement monté n'est pas satisfaisant.

A. *Emploi d'un réfrigérant d'air non conforme aux conditions de service.* Les données nominales caractérisant le fonctionnement d'un réfrigérant d'air sont : les pertes évacuées par le réfrigérant ; le débit d'air ; le débit d'eau ; la température d'eau à l'entrée ; la température d'air refroidi ; la différence de pression d'air. C'est le débit d'air qui affecte le plus sensiblement le bon fonctionnement du réfrigérant ; sa baisse par rapport à la valeur nominale non seulement diminue brusquement l'efficacité du réfrigérant mais compromet aussi celle de tout le système de refroidissement de la machine.

Consulter le représentant du constructeur.

B. *Le réfrigérant d'air convient par ses paramètres aux conditions de service mais la répartition du flux d'air entre les sections différentes ou entre les parties d'une même section n'est pas régulière (fig. 30).* Il peut en résulter une utilisation très faible d'une des sections (de la section supérieure sur la fig. 30, *a*) ou d'une partie de section. Une telle répartition irrégulière du courant d'air peut avoir pour causes une

conception défectueuse du réfrigérant ou une distribution défavorable des canaux d'air.

La répartition du courant d'air sur la surface active du réfrigérant d'air peut être déterminée en mesurant, à l'aide d'un anémomètre ou d'un tube pneumométrique,

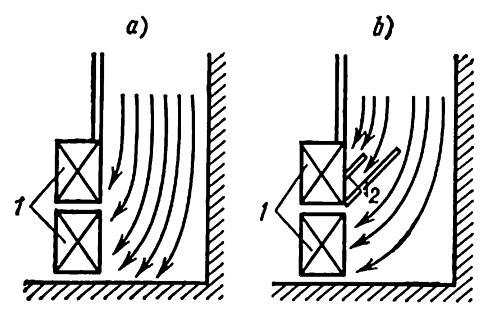


Fig. 30. Répartition du courant d'air entre les sections d'un réfrigérant d'air:
a: irrégulière; *b*: régulière.
1: section de réfrigérant d'air; 2: chicanes de guidage

la vitesse de l'air aux divers points de la section du canal d'air à l'entrée du réfrigérant d'air.

Il est recommandé d'installer une ou deux chicanes de guidage en tôles d'acier (fig. 30, *b*).

Une mesure générale permettant d'améliorer le fonctionnement du système de ventilation consiste à interposer une isolation thermique entre les canalisations d'air échauffé et celle d'air refroidi. Ce calorifugeage peut être réalisé au moyen de feuilles d'amiante de 5 mm d'épaisseur protégées de l'extérieur par des tôles d'acier de 1 mm d'épaisseur. Les tôles protectrices sont rivetées, ensemble avec les feuilles d'amiante, sur les canalisations d'air.

Chapitre 5

DÉFAUTS DES TRANSFORMATEURS

§ 48. Echauffement anormal du transformateur

48-1. Surcharge du transformateur.

Vérifier le régime de charge. En cas de transformateur à charge constante, la surcharge peut être constatée à l'aide d'un ampèremètre; dans le cas de transformateurs à diagramme de charge variable il convient de relever la courbe journalière de courant débité.

On devra tenir compte du fait que les transformateurs permettent des surcharges normales dont la valeur dépend de la courbe de charge, de la température du milieu ambiant et des sous-charges en été. En outre, dans certains cas exceptionnels (absence de réserve), on admet des surcharges de secours du transformateur indépendamment de sa charge précédente et de la température du milieu de refroidissement [11]. La température admissible des parties du transformateur et de l'huile est indiquée dans l'annexe 16. Diminuer la charge du transformateur en couplant en parallèle encore un transformateur supplémentaire ou en débranchant des utilisateurs non essentiels.

48-2. Température trop élevée dans le local des transformateurs.

Mesurer la température de l'air dans le local qui abrite le transformateur, à une distance de 1,5 à 2 m de la cuve à huile du transformateur, à mi-hauteur de celui-ci. Si cette température est de plus de 8 à 10 °C supérieure à la température de l'air

extérieur, améliorer la ventilation du local des transformateurs. Pour assurer une ventilation normale des locaux abritant les transformateurs d'une puissance égale ou supérieure à 1000 kVA, on utilise des cheminées d'appel spéciales installées en haut du local et on pratique, en bas du local, des trous d'amenée de l'air froid. Les orifices d'entrée et de sortie sont protégés par des grillages ou des crevés. En règle générale, la ventilation des locaux abritant les transformateurs est calculée de manière que la différence de température entre l'air entrant (en bas) et l'air sortant (en haut) ne soit pas supérieure à 15 °C.

48-3. Niveau d'huile trop bas dans le transformateur. Dans ce cas, les parties du bobinage et du fer actif non plongées dans l'huile chauffent anormalement.

S'assurer qu'il n'y a pas de fuite à la cuve et rétablir le niveau normal de l'huile.

48-4. Défauts à l'intérieur du transformateur: courts-circuits entre spires ou entre phases, création de circuits court-circuités par suite du mauvais état de l'isolation des boulons de serrage du fer actif, courts-circuits entre les tôles de fer actif (voir § 52-2, A à D).

Si les courts-circuits ne sont pas trop importants, tous ces défauts n'entraînent pas toujours une élévation notable de la température générale de l'huile malgré le haut niveau des températures locales. Ce n'est qu'une progression impétueuse de ces défectuosités qui peut provoquer une croissance rapide de la température de l'huile.

Voir § 52.

§ 49. Ronflement anormal du transformateur

49-1. Mauvais serrage des tôles du circuit magnétique feuilleté.

Resserrer les boulons correspondants.

49-2. Mauvais serrage des joints magnétiques plans de la carcasse.

Le serrage des boulons verticaux servant à l'assemblage des noyaux avec les traverses s'est affaibli avec le temps sous l'effet de la vibration du circuit magnétique. Il en a résulté une modification des entrefers dans les joints magnétiques, ce qui a entraîné un ronflement exagéré.

Refaire l'assemblage du circuit magnétique en remplaçant les garnitures dans ses joints supérieurs et inférieurs.

49-3. Les tôles extrêmes du circuit magnétique vibrent.

Bloquer les tôles au moyen du carton isolant.

49-4. Mauvais serrage des boulons fixant le couvercle du transformateur et autres pièces.

Vérifier et assurer le bon serrage de tous les boulons.

49-5. Transformateur surchargé ou phases très inégalement chargées.

Supprimer la surcharge ou diminuer le déséquilibre de charges.

49-6. Courts-circuits entre phases ou entre spires.

Réparer les bobinages.

49-7. Fonctionnement du transformateur sous une tension trop élevée.

Amener le commutateur de réglage de la tension (s'il est utilisé) sur la position correspondant à la tension accrue.

§ 50. Claquements à l'intérieur du transformateur

50-1. Amorçage (mais non claquage) entre l'enroulement ou les sorties et la masse par suite des surtensions.

Examiner et réparer les bobinages.

50-2. Coupure dans le circuit de mise à la terre. On sait que le fer actif et toutes les autres pièces constitutives du circuit magnétique du transformateur sont mis à la terre (c'est-à-dire reliés à la terre à travers les couvercles du transformateur et sa cuve), pour assurer l'écoulement, vers la terre, des charges statiques qui apparaissent sur ces parties (en effet, l'enroulement et les parties métalliques du circuit magnétique constituent des armatures de condensateur). Lorsque le circuit de terre est interrompu, des décharges électriques peuvent se produire entre l'enroulement ou ses sorties et la masse. Ces décharges sont perçues comme des claquements à l'intérieur du transformateur.

Rétablir la continuité des circuits de mise à la terre en pleine conformité avec la réalisation adoptée par le constructeur; raccorder les fils de terre aux mêmes points et du même côté du transformateur (généralement, du côté des sorties de l'enroulement à basse tension) que chez le constructeur. Un réta-

blissement incorrect des circuits de prise de terre peut entraîner la création, dans le transformateur, de circuits court-circuités parcourus par des courants.

§ 51. Défauts d'isolation et coupure des enroulements

51-1. Mise à la masse des enroulements, courts-circuits entre enroulements haute tension et basse tension ou entre phases.

A. *Surtensions causées par des phénomènes atmosphériques, par des pannes ou par des commutations.*

B. *Qualité de l'huile très mauvaise (humidité, encrassement, etc.).*

C. *Niveau trop bas de l'huile.*

D. *Usure naturelle (vieillissement) de l'isolation.*

E. *Apparition d'efforts électrodynamiques par suite des courts-circuits extérieurs ou des courts-circuits à l'intérieur du transformateur.*

Il convient de signaler que les surtensions peuvent causer non un claquage des isolants mais seulement des amorçages entre les enroulements, entre les phases ou entre un enroulement et la masse. Les traces d'amorçage sont généralement constituées par la fusion superficielle de plusieurs spires et le noir de fumée sur les spires voisines, alors que de vrais courts-circuits francs entre spires, entre phases ou entre enroulement et masse ne s'observent pas.

Un défaut d'isolation de l'enroulement peut être décelé au moyen d'un mégohmmètre. Pourtant, dans certains cas où, par suite des surtensions, l'enroulement comporte des endroits dénudés sous forme de points (décharge ponctuelle), le défaut ne peut être localisé qu'en faisant subir au transformateur un essai sous tension (appliquée ou induite).

Réparer les bobinages et, s'il est nécessaire, changer l'huile.

51-2. Coupures dans les enroulements (voir aussi § 53). Une coupure ou un mauvais contact entraîne la fusion ou la brûlure d'une partie du conducteur. Ce défaut se décèle par un dégagement de gaz combustible dans l'huile qui provoque le fonctionnement du relais Buchholz donnant un signal d'alarme ou mettant hors service le transformateur (voir § 52).

A. *Défectuosité des soudures de l'enroulement.*

B. *Défauts dans les fils (prises) reliant les extrémités des enroulements aux bornes.*

C. *Apparition d'efforts électrodynamiques par suite des courts-circuits à l'intérieur ou à l'extérieur du transformateur.*

Une coupure peut être décelée d'après les indications des ampèremètres ou au moyen d'un mégohmmètre. En cas de couplage en triangle, pour

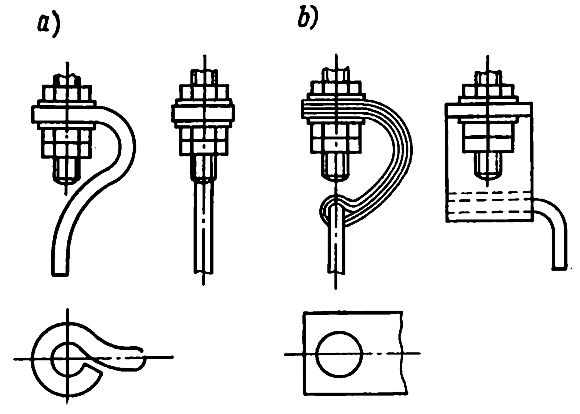


Fig. 31. Réalisation des connexions de sortie: *a*: en conducteur rond; *b*: en ruban de cuivre

localiser la phase comportant une rupture, se reporter à l'annexe 8, B, 2.

L'endroit de coupure peut être localisé au moyen d'un mégohmmètre, en utilisant, au besoin, la méthode de division de l'enroulement en parties.

La coupure se produit le plus souvent aux endroits où le fil est courbé en boucle pour être mis sous le boulon (fig. 31, *a*).

Réparer les bobinages. Pour éviter des coupures dans les connexions aux enroulements, il convient de remplacer les connexions en fil rond par celles en rubans de cuivre, ayant la même section que celle du conducteur rond (fig. 31, *b*).

§ 52. Fonctionnement de la protection Buchholz

On sait que la protection Buchholz sensible à des dégagements gazeux dans l'huile est une protection efficace contre les défectuosités se produisant à l'intérieur du transforma-

teur et contre un régime de fonctionnement perturbé. Suivant l'intensité du dégagement gazeux, cette protection soit donne un signal, soit met hors tension le transformateur, soit enfin produit les deux actions à la fois.

52-1. La protection Buchholz a donné un signal.

A. *Défauts peu importants à l'intérieur du transformateur provoquant un faible dégagement gazeux.*

B. *Pénétration de l'air à l'intérieur du transformateur lors du remplissage ou de l'épuration de l'huile.*

C. *Baisse lente du niveau d'huile par suite d'une baisse de la température ou d'une fuite d'huile à la cuve.*

52-2. La protection Buchholz a provoqué le fonctionnement du signal et la mise hors service du transformateur ou seulement la mise hors service. Cela est dû à des défectuosités internes et à d'autres causes entraînant un dégagement gazeux important.

A. *Court-circuit entre spires au primaire ou au secondaire du transformateur.*

Ce défaut peut avoir pour causes: une mauvaise isolation des connexions intermédiaires, l'écrasement de l'isolant des spires lors de l'empilage ou par des bavures sur le cuivre de la spire, des dégradations mécaniques de l'isolation, l'usure naturelle de l'isolation, des surtensions, des efforts électrodynamiques développés en cas de courts-circuits, la mise à nu de l'enroulement par suite d'une baisse du niveau d'huile.

Les spires en court-circuit sont parcourues par un courant de forte intensité, alors que la croissance du courant de phase peut être peu importante; l'isolant de ces spires brûle vite, de sorte que les spires elles-mêmes peuvent aussi brûler en amenant parfois la destruction des spires voisines. Si ce défaut persiste et progresse, il peut se transformer en un court-circuit entre phases.

Si le nombre de spires court-circuitées est grand, l'huile s'échauffe rapidement et peut se mettre en état d'ébullition.

Si le transformateur ne comporte pas de relais de protection Buchholz, de l'huile et de la fumée peuvent être projetées à travers le bouchon de protection du conservateur d'huile.

Les courts-circuits entre spires s'accompagnent non seulement d'un échauffement anormal de l'huile et d'une légère croissance du courant du côté alimentation mais aussi d'une

diminution de la résistance ohmique de la phase dont certaines spires sont en court-circuit.

B. *Court-circuit entre phases* dû aux mêmes causes que celles indiquées au § 51-1 pour les défauts d'isolation progressant d'une façon assez intense. Ce défaut peut amener la projection de l'huile du conservateur ou à travers le diaphragme du tube de protection (dans les transformateurs d'une puissance égale ou supérieure à 1000 kVA).

C. *Création d'un circuit court-circuité par suite d'une détérioration de l'isolant des boulons servant au serrage des tôles magnétiques du transformateur.*

Le circuit court-circuité chauffe fortement et entraîne un échauffement anormal de l'huile. Le boulon avarié et les tôles magnétiques voisines peuvent être détruits.

Dans les transformateurs à joints magnétiques plats, un circuit court-circuité peut être constitué lorsque les appliques servant à l'empilage des noyaux viennent en contact avec les traverses [27].

D. *Court-circuit entre tôles du circuit magnétique par suite d'une dégradation de l'isolant ou de son usure naturelle (de son vieillissement).*

Un tel défaut a pour conséquence l'apparition d'intenses courants de Foucault qui provoquent des échauffements locaux exagérés du fer actif et peuvent amener, à la longue, des brûlures locales du fer (« incendie dans le fer »).

Dans les carcasses à joints magnétiques plats, les courants de Foucault peuvent occasionner un échauffement anormal des joints par suite d'une dégradation des isolants interposés.

E. *Baisse considérable du niveau d'huile dans le transformateur ou dégagement intense de l'air de l'huile par suite d'une brusque diminution de la température de l'air extérieur ou après réparation (remplissage avec de l'huile fraîche, épuration centrifuge de l'huile, etc.).*

Il y a lieu de signaler que, dans la pratique d'exploitation des transformateurs, on a constaté des cas de faux fonctionnement de la protection Buchholz dus à des défauts dans les circuits de commutation secondaires.

Puisque le fonctionnement de la protection Buchholz peut être provoqué par de diverses causes, il convient, avant de procéder au dépannage, de rechercher la cause réelle qui a amené le fonctionnement de la protection Buchholz. A cet effet il est

nécessaire de déterminer la protection (par relais) qui a fonctionné et d'effectuer l'analyse des gaz qui se sont accumulés dans le relais Buchholz en vue de déterminer leurs combustibilité, couleur, quantité et composition chimique.

Pour déterminer la combustibilité des gaz, il convient de présenter une allumette allumée près du robinet supérieur du relais Buchholz et d'ouvrir ensuite ce robinet. La combustibilité du gaz témoigne d'un défaut à l'intérieur du transformateur. Si les gaz sont incolores et ne brûlent pas, c'est l'indice que le fonctionnement du relais de protection a été provoqué par l'air dégagé de l'huile.

La couleur du gaz dégagé permet de juger de la nature du matériau dégradé; la couleur gris blanc témoigne de la dégradation du papier ou du carton, la couleur jaune de celle du bois et la couleur noire de celle de l'huile. La couleur du gaz pouvant disparaître au bout d'un certain temps, il convient de la déterminer tout de suite, à l'instant de son apparition. Une baisse de la température d'inflammation de l'huile est aussi l'indice d'un défaut interne.

Dans le cas où le fonctionnement de la protection Buchholz a été provoqué par un dégagement d'air de l'huile il convient d'évacuer l'air du relais Buchholz.

En cas de baisse du niveau de l'huile il convient de rétablir le niveau normal après avoir débranché la protection pour le fonctionnement à la mise hors tension. Dès que le niveau normal de l'huile est rétabli et l'air cesse de se dégager, la protection Buchholz doit être remise en circuit.

En cas des défauts des bobinages, localiser l'endroit de défaut et procéder aux réparations correspondantes. A cet effet il est nécessaire d'ouvrir le transformateur et de sortir le noyau.

Les spires en court-circuit de l'enroulement peuvent être localisées en alimentant le transformateur sous une tension réduite du côté basse tension. Le circuit court-circuité sera fortement échauffé et une fumée se dégagera du bobinage. Ce procédé permet également de localiser d'autres circuits court-circuités (voir § 52-2, C).

Pour localiser un défaut d'isolement de l'enroulement, voir § 51-1 et pour localiser une coupure dans l'enroulement, voir § 51-2.

Des endroits défectueux dans le fer actif peuvent être localisés en marche à vide du transformateur (les noyaux

étant sortis) : ces endroits seront fortement échauffés. Lors de cet essai, la tension est appliquée à l'enroulement basse tension et est augmentée à partir de zéro ; l'enroulement haute tension doit être, au préalable, coupé en plusieurs points pour éviter son claquage (par suite de l'absence d'huile).

Les courts-circuits entre les tôles du circuit magnétique et la fusion superficielle des tôles peuvent être supprimés par un nouveau empilage de la partie avariée du circuit magnétique, en remplaçant l'isolation entre tôles. L'isolation défectueuse dans les joints du circuit magnétique est à remplacer par une nouvelle isolation constituée de feuilles d'amiante de 0,8 à 1,0 mm d'épaisseur imprégnées de vernis glycérophtalique avec interposition, en haut et en bas, du papier pour câbles de 0,07 à 0,1 mm d'épaisseur [27].

§ 53. Valeur anormale de la tension secondaire du transformateur

53-1. Les tensions primaires sont identiques ; les tensions secondaires sont identiques en marche à vide mais fortement déséquilibrées en charge.

A. *Mauvais contact à la connexion de l'une des bornes ou à l'intérieur de l'enroulement de l'une des phases.*

B. *Coupure dans le primaire d'un transformateur à colonnes couplé triangle-étoile ou triangle-triangle.*

53-2. Les tensions primaires sont identiques ; les tensions secondaires sont déséquilibrées en marche à vide et en charge.

A. *Inversion de l'enroulement (l'entrée et la sortie de l'enroulement interverties) de l'une des phases de l'enroulement secondaire couplé en étoile.*

B. *Coupure dans le primaire d'un transformateur étoile-étoile. Dans ce cas, aucune des trois tensions entre phases secondaires n'est nulle.*

C. *Coupure dans le secondaire d'un transformateur étoile-étoile ou triangle-étoile.* Dans ce cas, une seule tension entre phases secondaires n'est pas nulle, alors que les deux autres tensions entre phases sont nulles. En cas de couplage en triangle-triangle, une coupure dans le circuit secondaire ne peut être localisée que par la mesure des résistances (voir fig. 17 de l'annexe 8) ou d'après l'échauffement des bobinages ; l'enroulement de phase présentant une coupure sera

froid parce qu'il ne sera parcouru par aucun courant. Dans ce dernier cas, il est possible d'utiliser le transformateur, temporairement, pour une charge de courant secondaire égale à 58 % de la charge nominale.

Pour supprimer les défauts provoquant un déséquilibre des tensions secondaires du transformateur il est nécessaire de procéder à la réparation des bobinages. Pour la localisation des coupures dans l'enroulement, voir § 51-2, C.

§ 54. Répartition non uniforme des charges entre les transformateurs fonctionnant en parallèle

54-1. **Les rapports de transformation des transformateurs mis en parallèle (couplés en parallèle du côté primaire et du côté secondaire) ne sont pas les mêmes.** Dans ce cas, un courant égalisateur circule entre les transformateurs; lors de la marche en charge, le transformateur à tension secondaire plus élevée (en marche à vide) prend une charge plus élevée (en pourcentage).

54-2. **Les tensions de court-circuit des transformateurs couplés en parallèle sont différentes.** Dans ce cas, la charge se répartit entre les transformateurs proportionnellement à leurs puissances nominales et à raison inverse des tensions de court-circuit. La mise en parallèle des transformateurs appartenant à des groupes de couplage différents est équivalente à leur mise en court-circuit.

Pour que la répartition des charges entre les transformateurs couplés en parallèle soit pratiquement uniforme, il faut:

1) que leurs rapports de transformation soient les mêmes (dans les limites des tolérances: ±1 % pour les transformateurs à rapport de transformation inférieur à 3, et ±0,5 % pour les autres); 2) que leurs tensions de court-circuit soient les mêmes (dans les limites des tolérances: ±10 % pour tous les transformateurs); 3) qu'ils appartiennent au même groupe de couplage. Pour obtenir une bonne marche en parallèle est également recommandé que le rapport de la puissance maximale à la puissance minimale des transformateurs ne soit pas supérieur à 3 : 1.

La mise en parallèle d'un transformateur après son installation, après sa révision générale comportant le remplacement des bobinages ou après la pose d'un nouveau câble n'est admissible qu'après sa mise en phase (voir annexe 3).

§ 55. Défauts des commutateurs de réglage de la tension

Le présent paragraphe est consacré à l'examen des commutateurs servant au réglage du rapport de transformation lorsque le transformateur est mis hors tension.

Les surfaces de contact (les tiges et les bagues) présentent des traces de fusion ou sont complètement brûlées.

A. *Conception défectueuse du commutateur n'assurant pas une pression de contact nécessaire (se rencontre surtout dans des commutateurs d'anciens types).*

B. *Mauvais montage du commutateur.*

C. *Effet thermique dû aux courants de court-circuit.*

Une fusion considérable ou une brûlure des surfaces de contact du commutateur peut provoquer une altération de l'huile et amener le fonctionnement de la protection Buchholz (voir § 52).

En cas de défectuosités peu importantes des surfaces de contact on peut se borner au nettoyage à la lime des endroits fondus et à leur rectification soigneuse au moyen de la toile d'émeri. Si les fusions sont importantes, il est recommandé de remplacer le commutateur par un neuf. Suivant le type constructif du commutateur et les défauts de son montage, d'autres défauts peuvent se présenter et provoquer une avarie du transformateur.

Pour pouvoir déceler à temps les défauts des commutateurs, il est recommandé de mesurer périodiquement la résistance ohmique des enroulements entre toutes les prises.

§ 56. Fuite d'huile

56-1. Défauts d'étanchéité dans les joints de soudure de la cuve du transformateur, entre les parois ondulées de la cuve et son fond, aux endroits de mandrinage des tubes dans les parois de la cuve, des radiateurs aux endroits de soudure, etc.

Assurer l'étanchéité aux endroits de fuite au moyen du soudage acétylénique. Avant de procéder au soudage de la cuve, vidanger l'huile, retirer le transformateur et déposer les radiateurs de la cuve.

Après le soudage, faire subir à la cuve un essai à l'eau pendant 1 ou 2 heures, sous une pression de la colonne d'eau de 1,5 m de hauteur au-dessus du niveau d'huile dans le conservateur. A cet effet, on remplit la cuve avec de l'eau et on visse dans le couvercle de la cuve hermétiquement fermée un tube de 1,5 m de longueur et de $^3/_4$ à 1 pouce de diamètre, muni, en haut, d'un entonnoir par lequel on effectue le remplissage définitif de la cuve et du tube avec de l'eau. Cet essai de la cuve peut être également effectué à l'aide de l'huile. Une fuite d'huile peu importante peut être supprimée par matage.

56-2. Manque d'étanchéité entre le couvercle et la cuve. Resserrer les boulons de fixation du couvercle. Si cela est insuffisant, remplacer le joint d'étanchéité.

56-3. Défauts d'étanchéité dans l'installation des bornes.

Une fuite d'huile entre les flasques d'appui et le couvercle du transformateur peut être supprimée par serrage des boulons ou par remplacement du joint d'étanchéité. Dans le cas où l'isolateur en porcelaine comporte une collerette, un suintement de l'huile à travers les accessoires du flasque d'appui est à supprimer par le scellement de l'isolateur dans un nouveau flasque avec interposition d'un joint en caoutchouc entre le haut du flasque et la surface d'appui. Si l'isolateur en porcelaine est d'un ancien type (sans collerette ni joint en caoutchouc ou en liège), il faut remplacer toute la borne [27]. En cas d'infiltration de l'huile à travers la tête scellée, la borne doit être remplacée. Le suintement de l'huile vers le haut, le long de la tige de connexion, peut être supprimé en enroulant du cordon d'amiante imprégné de vernis sous l'écrou inférieur.

ANNEXE 1

Repérage des bornes des machines électriques. Schémas des couplages normaux

A. Machines à courant continu

Les extrémités des enroulements des machines à courant continu sont repérées d'après les normes soviétiques GOST 183-74 comme il est indiqué dans le tableau 1.

Tableau 1

Dénomination de l'enroulement	Désignation des extrémités	
	entrée	sortie
Enroulement d'induit	Я1	Я2
Enroulement de compensation	К1	К2
Enroulement des pôles auxiliaires	Д1	Д2
Enroulement d'excitation série	С1	С2
Enroulement d'excitation séparée	Н1	Н2
Enroulement d'excitation dérivation	Ш1	Ш2
Enroulement de démarrage	П1	П2
Fil d'équilibre et enroulement d'équilibre	У1	У2
Enroulement d'emploi spécial	О1; О3	О2; О4

L'entrée et la sortie de chaque enroulement sont désignées par une même lettre majuscule suivie d'un chiffre qui est « 1 » pour le commencement de l'enroulement et « 2 » pour sa fin. L'entrée et la sortie de chaque enroulement sont déterminées par la condition suivante: lorsque la machine fonctionnant en moteur tourne à droite, le courant dans tous ses enroulements à l'exception des enroulements démagnétisants des pôles principaux circule de l'entrée « 1 » vers la sortie « 2 ». Le sens de rotation d'une machine est dit « à droite » lorsqu'il correspond au sens des aiguilles d'une montre pour un observateur placé face au bout d'arbre

s'il n'en existe qu'un; pour les machines comportant deux bouts d'arbre, le sens de rotation est dit « à droite » si la machine tourne dans le sens des aiguilles d'une montre pour un observateur placé du côté opposé au collecteur. Conformément à ces conditions, dans les machines à rotation à droite l'entrée de l'enroulement de l'induit (Я1) se trouve sur les balais dont la polarité est celle à laquelle on raccorde le fil positif du réseau indépendamment du mode de fonctionnement de la machine: en moteur ou en générateur. Autrement dit, dans le cas d'un moteur, le courant va du réseau à l'extrémité Я1, alors que dans le cas d'une génératrice il va de l'extrémité Я1 au réseau.

Il est bien connu que pour changer le sens de rotation d'une machine à courant continu, tout en conservant son régime de fonctionnement en moteur ou en génératice, il est nécessaire d'inverser le sens du courant soit dans les enroulements des pôles principaux soit dans l'induit, dans l'enroulement des pôles auxiliaires et dans l'enroulement de compensation.

Dans les petites machines, les entrées et les sorties des enroulements aboutissent généralement à une plaque de bornes (fig. 1 et 2). Dans ce cas, l'une des bornes de l'induit (couronne porte-balais) et l'une des bornes des pôles auxiliaires sont reliées à demeure à l'intérieur de la machine, alors que les autres bornes de l'induit et des pôles auxiliaires sont disposées sur la plaque à bornes. Dans certains cas (pour assurer l'antiparasitage, par exemple), l'enroulement des pôles auxiliaires est divisé en deux parties connectées de part et d'autre de l'induit comme il est montré sur la fig. 3. Dans de tels cas, on connecte à la boîte de bornes l'entrée Д1 de l'une des moitiés de l'enroulement des pôles auxiliaires et la sortie Д2 de l'autre.

Les grosses machines prévues pour de fortes intensités du courant ne comportent pas de plaque à bornes; les entrées et les sorties des enroulements sont fixées à la partie basse de la carcasse de la machine. Dans ces conditions, les connexions externes sont réalisées à l'aide de barres pour le circuit série et à l'aide de câbles terminés par des cosses pour le circuit dérivation. On fait sortir à l'extérieur la borne d'induit Я1, la borne de l'enroulement de compensation K2, les bornes de l'enroulement d'excitation dérivation Ш1 et Ш2, les bornes de l'enroulement d'équilibre У1 et У2 et des autres enroulements spéciaux.

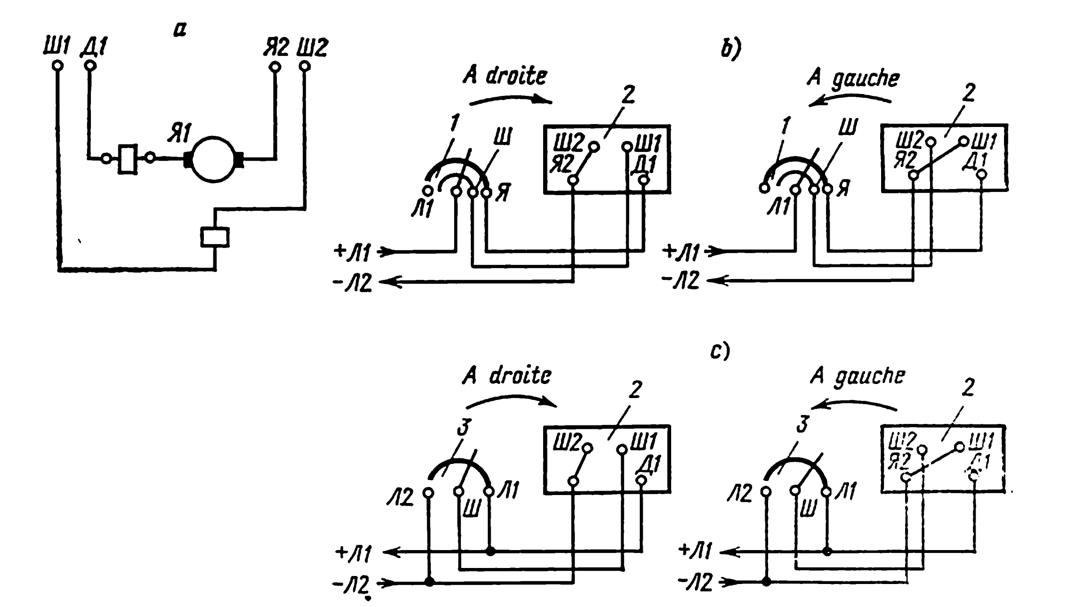


Fig. 1. Schémas des connexions de sortie d'une machine à courant continu à excitation en dérivation :
a : schéma de principe ; *b* : schémas de branchement pour le fonctionnement en moteur ; *c* : schémas de branchement pour le fonctionnement en génératrice.

1 : rhéostat de démarrage ; *2* : plaque de bornes ; *3* : rhéostat de champ ; Ш : enroulement dérivation ; Д : enroulement des pôles auxiliaires ; Я : enroulement d'induit ; Л : ligne

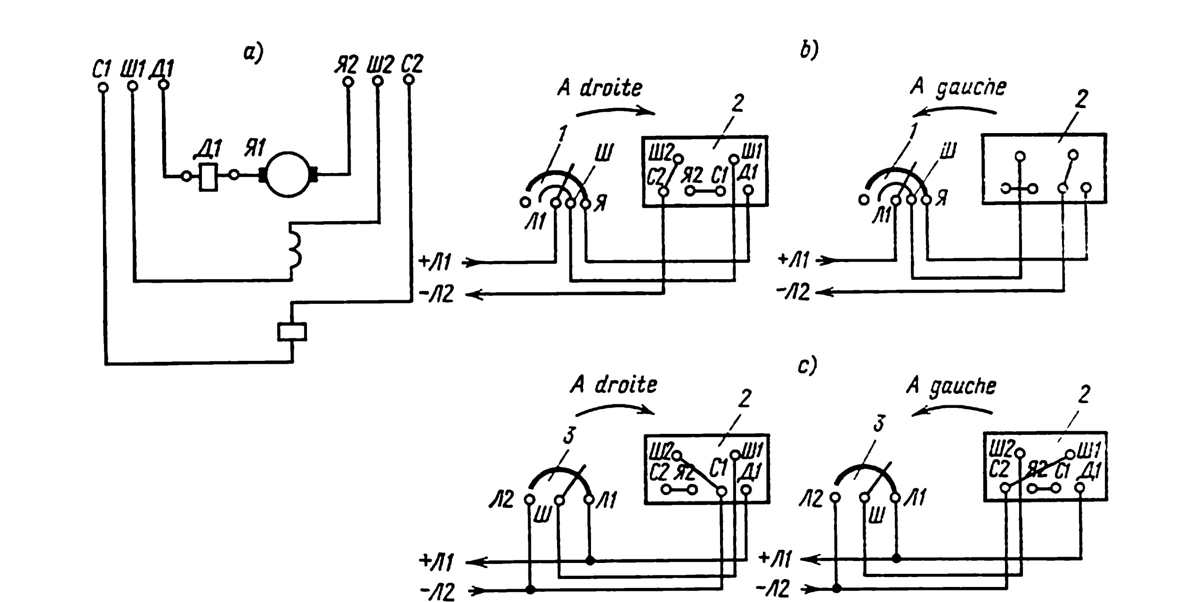


Fig. 2. Schémas des connexions de sortie d'une machine à courant continu à excitation composée:

a: schéma de principe; *b*: schémas de branchement pour le fonctionnement en moteur; *c*: schémas de branchement pour le fonctionnement en génératrice; C: enroulement série.

Les autres désignations sont identiques à celles de la fig. 1

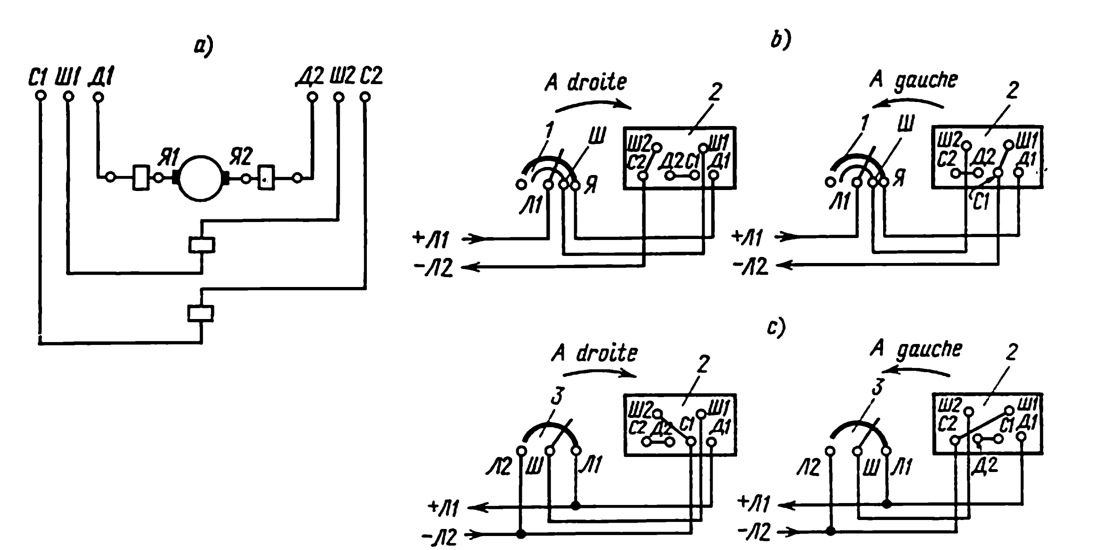


Fig. 3. Schémas des connexions de sortie d'une machine à courant continu à excitation composée dont les parties de l'enroulement des pôles auxiliaires sont placées de deux côtés de l'induit

a: schémas de principe; *b*: schémas de branchement pour le fonctionnement en moteur; *c*: schémas de branchement pour le fonctionnement en génératrice.

Les désignations sont identiques à celles de la fig. 1

Dans les grosses machines à forte intensité du courant, les enroulements des pôles auxiliaires et l'enroulement de compensation sont réalisés chacun sous forme de deux branches parallèles et chaque branche de l'enroulement des pôles auxiliaires est connectée en série avec la branche voisine de l'enroulement de compensation. La fig. 4 montre un tel schéma du couplage des enroulements d'un gros moteur de laminoir. Les branches distinctes des enroulements des pôles auxiliaires et de l'enroulement de compensation sont repérées par des chiffres complémentaires 1 et 2 qui précèdent

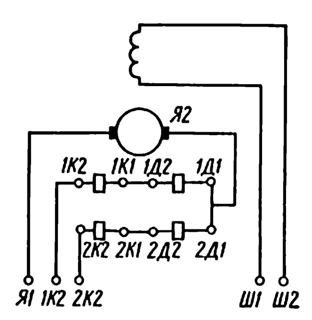


Fig. 4. Schéma des connexions de sortie d'une machine à courant continu dont les enroulements série sont réalisés sous forme de branches parallèles

les lettres Д et К; ces chiffres se rapportent respectivement à la première et à la deuxième partie de ces enroulements.

Les fig. 1, 2 et 3 représentent les schémas des couplages des enroulements de divers types de machines à courant continu pour les cas de leur fonctionnement en moteur et en génératrice (les enroulements d'excitation étant montés à flux additif) et les divers sens de rotation.

Dans le cas où le sens de rotation à gauche du rotor de la machine est obtenu en inversant le sens du courant dans l'enroulement dérivation, l'entrée Я1 de l'enroulement d'induit est aussi raccordée au fil positif du réseau. Si la rotation à gauche de la machine est obtenue en changeant le sens du courant dans l'induit, l'entrée Я1 de l'enroulement d'induit est reliée au fil négatif du réseau.

Dans les schémas mentionnés plus haut, toutes les connexions nécessaires pour les divers sens de rotation sont réalisées en partant des considérations suivantes: premièrement, dans le cas considéré des machines à flux additif, il est nécessaire que la force magnétomotrice de l'enroulement série agisse, quel que soit le sens de rotation de la machine,

dans le même sens que la force magnétomotrice de l'enroulement dérivation; deuxièmement, si l'on laisse intactes les connexions de sortie lors du passage du fonctionnement en génératrice au fonctionnement en moteur ou inversement, alors, pour le même sens de rotation, le courant changera de sens dans l'induit et dans les pôles auxiliaires mais gardera le même sens dans les enroulements d'excitation série et dérivation.

Dans les schémas considérés, le changement du sens de rotation du moteur ou de la génératrice est obtenu par l'inversion du sens du courant dans les enroulements d'excitation.

Dans certains cas, en choisissant une variante de connexions des sorties pour le fonctionnement de la machine en moteur ou en génératrice, on se conforme aux exigences du montage le plus commode du jeu de barres. Parfois, il s'avère nécessaire de changer le sens de rotation de la génératrice seulement par l'inversion du sens de courant dans l'induit. Cette condition peut être imposée par l'impossibilité (d'après les conditions locales) ou l'indésirabilité d'inverser le sens du magnétisme rémanent, étant donné que l'autoamorçage de la génératrice n'est possible que dans le cas où le sens du courant dans l'enroulement d'excitation est tel qu'il renforce le magnétisme rémanent.

B. Machines à courant alternatif

Les extrémités des enroulements des machines à courant alternatif triphasé sont repérées d'après la norme soviétique GOST 183-74 comme il est indiqué dans le tableau 2.

Conformément à cette norme, dans les machines à un seul sens de marche, l'ordre de succession des désignations des sorties doit correspondre à l'ordre de succession des phases pour le sens de rotation donné.

Les bornes des machines à courant alternatif utilisant des enroulements multiples (doubles, triples) ou des enroulements fractionnés doivent être désignées par les mêmes lettres que les enroulements simples (tableau 2) mais en faisant précéder les lettres majuscules par des chiffres complémentaires.

Un exemple de repérage des bornes pour deux enroulements sur le stator est donné par le tableau 3.

Tableau 2

Dénomination et mode de couplage des enroulements	Nombre de bornes	Dénomination des bornes	Désignation des bornes	
			entrée	sortie
Enroulements de stator (d'induit):				
non couplés	6	Première phase	C1	C4
		Deuxième phase	C2	C5
		Troisième phase	C3	C6
couplage en étoile	3 ou 4	Première phase	C1	
		Deuxième phase	C2	
		Troisième phase	C3	
		Point neutre	0	
couplage en triangle	3	Première borne	C1	
		Deuxième borne	C2	
		Troisième borne	C3	
Enroulements d'excitation (enroulements inducteurs) d'une machine synchrone . .	2	—	И1	И2

Les bornes des moteurs asynchrones employant des enroulements fractionnés permettant de modifier le nombre de pôles doivent être désignées par les mêmes lettres qu'en

Tableau 3

Pour le premier enroulement		Pour le deuxième enroulement	
1C1	1C4	2C1	2C4
1C2	1C5	2C2	2C5
1C3	1C6	2C3	2C6

cas d'emploi d'enroulements ordinaires (tableau 2) mais en faisant précéder les grandes lettres par des chiffres complémentaires indiquant le nombre de pôles de la section donnée.

Un exemple de repérage des bornes pour des enroulements d'un moteur à quatre vitesses de rotation est fourni par le tableau 4.

Tableau 4

Pour 4 pôles	Pour 6 pôles	Pour 8 pôles	Pour 12 pôles
4C1 4C2 4C3	6C1 6C2 6C3	8C1 8C2 8C3	12C1 12C2 12C3

Les extrémités des enroulements rotoriques des moteurs asynchrones doivent être repérées comme il est indiqué dans le tableau 5.

Tableau 5

Nombre d'extrémités sur les bagues collectrices	Dénomination des bornes	Désignation de l'entrée et de la sortie de l'enroulement
3	Première phase Deuxième phase Troisième phase	P1 P2 P3
4	Première phase Deuxième phase Troisième phase Point neutre	P1 P2 P3 0

Les bagues collectrices sur les rotors des moteurs asynchrones triphasés et monophasés doivent être repérées par les mêmes lettres qui désignent les extrémités de l'enroulement rotorique reliées à ces bagues; les bagues doivent être disposées dans l'ordre de ces lettres et la bague P1 doit être la plus éloignée de l'enroulement rotorique. La désignation des bagues elles-mêmes par des lettres n'est pas imposée.

Les extrémités des enroulements dans les machines monophasées sont à repérer comme il est indiqué dans le tableau 6.

Les fig. 5, *a* et *c* montrent les schémas de disposition des bornes auxquelles aboutissent les extrémités des enroulements statoriques des machines triphasées (synchrones ou asynchrones) pour le cas de trois bornes et le couplage des trois phases respectivement en étoile et en triangle, tandis

Nombre de bornes	Dénomination des enroulements	Désignation des extrémités	
		entrée	sortie
2	Enroulement de stator (d'induit) des machines synchrones	C1	C2
	Enroulements de stator des moteurs asynchrones :		
2	principal	C1	C2
2	auxiliaire	B1	B2
2	Enroulement d'excitation (inducteur) des machines synchrones	H1	H2

que la fig. 5, *b* représente la disposition de quatre bornes (recevant trois fils de phase et le fil neutre du montage en étoile).

La fig. 6 montre les schémas de disposition des bornes d'un enroulement statorique triphasé en cas d'emploi de six bornes. On prévoit six bornes sur les grosses machines pour le branchement des transformateurs de courant faisant partie du dispositif de protection par relais. En outre, dans bien des cas, les enroulements statoriques des petites machines triphasées aboutissent également à six bornes en vue de rendre possible le fonctionnement de ces machines sous l'une ou l'autre de deux tensions différentes. Dans ce dernier cas, la disposition des bornes dans la boîte à bornes est celle qui est indiquée sur les fig. 6, *b* et *c*. Une telle disposition des bornes a pour objet de faciliter le couplage des enroulements soit en triangle, soit en étoile: c'est ainsi par exemple que pour obtenir le montage en étoile il suffit de relier entre elles par une barrette les trois bornes de sortie C6, C4 et C5 et de brancher sur le réseau les bornes d'entrée C1, C2 et C3 (fig. 6, *b*), alors que pour le couplage en étoile des trois phases il faut relier deux à deux, suivant la verticale, les bornes C6-C1, C4-C2 et C5-C3 (fig. 6, *c*) et les raccorder au réseau.

Les fig. 7, *a* et 7, *b* montrent la disposition des bornes des enroulements statoriques sur les gros turbo-alternateurs, si l'on les regarde en faisant face à l'excitatrice. La première rangée réunit les bornes C1, C6, C2, C5, C3 et C4, la deuxième rangée (derrière la première) les bornes 1C1,

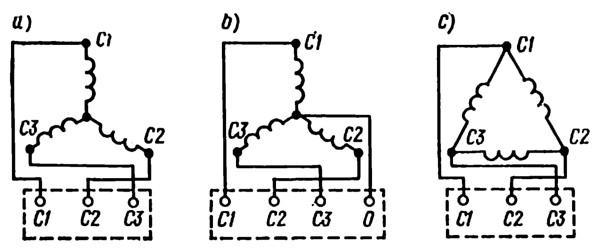


Fig. 5. Schémas des connexions des enroulements statoriques triphasés:
a: couplage en étoile; *b*: couplage en étoile avec neutre sorti; *c*: couplage en triangle

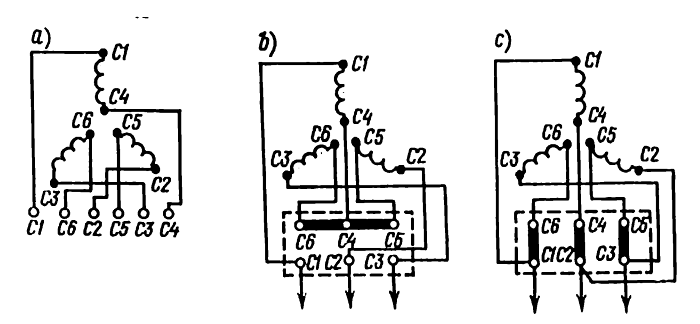


Fig. 6. Schémas de disposition des bornes des enroulements triphasés en cas d'emploi de six bornes:
a: à une rangée; *b* et *c*: à deux rangées pour faciliter le couplage soit en étoile, soit en triangle

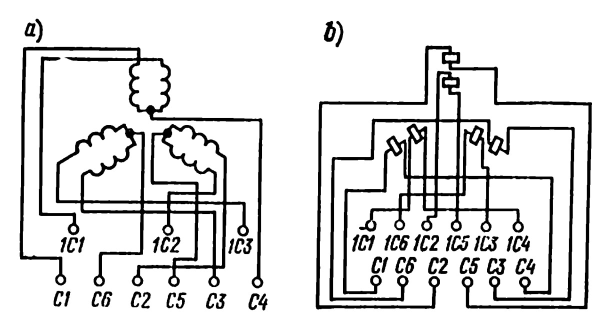


Fig. 7. Schémas de disposition des bornes des enroulements statoriques de gros turbo-alternateurs:
a: en cas de neuf bornes; *b*: en cas de douze bornes

1C2, 1C3, etc. Chaque phase est constituée de deux branches. La fig. 7, *a* montre la disposition de neuf bornes et la fig. 7, *b*, la disposition de douze bornes.

ANNEXE 2
Vérification du couplage correct des enroulements
A. Machines à courant continu

1. Vérification de la polarité des pôles. En vérifiant le couplage des enroulements inducteurs, on détermine tout d'abord si les connexions entre les bobines des divers pôles assurent l'alternance correcte de la polarité tant des pôles principaux que des pôles auxiliaires, et, ensuite, on s'assure du couplage correct de l'ensemble de chaque enroulement. Il est nécessaire que l'alternance des pôles de commutation par rapport à l'alternance des pôles principaux corresponde au sens de rotation déterminé de la machine, suivant que cette machine fonctionne en moteur ou en génératrice. Les pôles principaux et les pôles de commutation doivent alterner de manière qu'en tournant dans le sens du mouvement de la machine, on rencontre derrière chaque pôle principal un pôle auxiliaire de nom contraire ($\rightarrow N—s—S—n$) lorsque la machine fonctionne en génératrice et un pôle auxiliaire de même nom ($\rightarrow N—n—S—s$) si la machine marche en moteur.

Dans ce qui suit, nous écrivons les divers procédés permettant de déterminer l'alternance de la polarité des pôles.

Détermination de l'alternance des pôles par examen externe. On suit le sens dans lequel le courant parcourt l'enroulement et, en utilisant la règle du tire-bouchon, on détermine la polarité des pôles, en se donnant un sens conventionnel du courant. Ce procédé est commode lorsque les enroulements sont accessibles et le mode de réalisation des bobines est évident ou lorsqu'on est certain que toutes les bobines sont enroulées dans le même sens et que les extrémités de même nom, c'est-à-dire les entrées et les sorties des bobines ont la même disposition. Le procédé considéré est surtout applicable aux bobines des enroulements série dans lesquelles le sens de bobinage est très facile à établir grâce à une forte section des spires.

Les bobines des pôles principaux et celles des pôles de commutation sont généralement enroulées selon des schémas identiques. La fig. 1, *a* montre la connexion en série de toutes les bobines des pôles principaux et la fig. 1, *b* illustre la connexion des pôles en deux branches parallèles. Dans cette figure, les entrées et les sorties des enroulements des divers pôles sont désignées respectivement par des lettres *H* et *K* (suivies d'un chiffre indiquant le numéro d'ordre du pôle). L'une des branches est constituée par tous les pôles pairs et

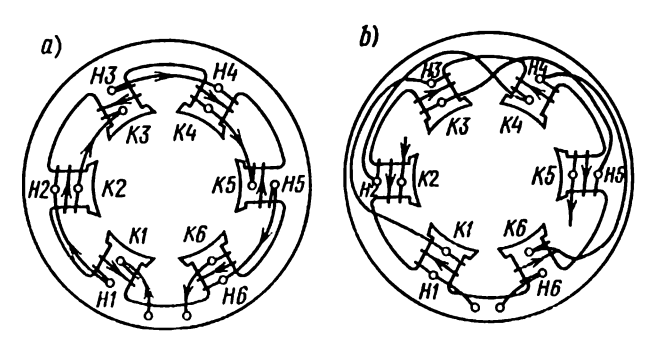


Fig. 1. Couplages des bobines inductrices:
a: en série; *b*: en deux branches parallèles; H: entrée; K: sortie

l'autre par tous les pôles impairs, c'est-à-dire que chaque branche comporte une moitié des pôles branchés en série. On fait usage d'un tel couplage des bobines inductrices dans les grosses machines en cas de montage en parallèle des enroulements série des pôles principaux et des pôles auxiliaires, ou en cas de montage en série des enroulements des pôles auxiliaires dont les deux branches sont placées de part et d'autre de l'induit (voir fig. 3, *a* de l'annexe 1).

Recherche de l'alternance des pôles au moyen d'une aiguille aimantée. On fait passer un courant dans l'enroulement. On suspend sur un fil mince une aiguille aimantée et on la présente, en procédant prudemment (pour éviter de provoquer le basculement de son état magnétique) à chaque pôle, l'un après l'autre. On juge de la polarité de chaque pôle d'après l'extrémité de l'aiguille magnétique qu'il attire.

En qualité d'aiguille magnétique on peut utiliser deux plumes d'acier attachées l'une à l'autre avec un fil de fer et suspendues sur un fil de coton (fig. 2). Au préalable, on

devra aimanter ces plumes et marquer leur polarité. On devra avoir en vue qu'un champ magnétique trop intense peut renverser l'aimantation de l'aiguille, si sa rotation est artificiellement empêchée. C'est pourquoi, il n'est pas recommandé d'employer une aiguille aimantée dans une monture quelconque (une boussole), pouvant entraver son mouvement libre.

Dans une machine démontée, l'aiguille aimantée est présentée près de la surface interne des pôles et dans une

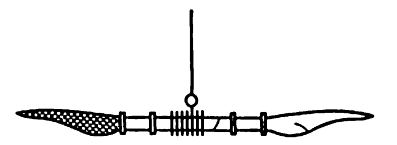


Fig. 2. Emploi de plumes d'acier en qualité d'aiguille aimantée

machine assemblée, près des épanouissements polaires. Si la machine est du type fermé, l'aiguille aimantée est présentée près des têtes des boulons qui fixent les pièces polaires sur la carcasse. Dans ce dernier cas, il faudra injecter dans l'enroulement un courant plus intense que dans les cas précédents ; en outre, on devra avoir en vue que dans ce cas l'aiguille indiquera la polarité inverse de la polarité réelle du pôle. Mais des difficultés naissent lorsqu'on cherche à déterminer par le procédé de l'aiguille aimantée la polarité des pôles produits par les enroulements série (l'enroulement série des pôles principaux, l'enroulement des pôles auxiliaires) des grosses machines parce que l'alimentation de ces enroulements exige de fortes intensités sous une basse tension. Si l'intensité du courant est insuffisante et l'aimantation qu'il produit est faible, la présence du magnétisme rémanent peut entraîner une indication incorrecte de l'aiguille.

Recherche de la polarité des pôles au moyen d'une bobine spéciale. La bobine d'essai (fig. 3, *a*) est réalisée sous la forme de plusieurs spires en fil fin isolé, collées ou fixées par un autre procédé, sur un morceau de carton mince ; les extrémités de la bobine sont reliées à un millivoltmètre. Pour déterminer la polarité d'un pôle, on fait passer le courant à travers son enroulement, on introduit la bobine d'essai dans l'entrefer entre l'induit et la pièce polaire et on la retire tout de suite ; il en résulte que l'aiguille du millivoltmètre dévie dans un sens déterminé suivant le sens du cou-

rant dans l'enroulement. Si l'alternance des pôles est correcte, les déviations de l'aiguille du millivoltmètre dans un sens alterneront avec ses déviations dans le sens opposé.

En déplaçant la bobine d'essai d'un pôle à un autre, il faut veiller à ce qu'elle ne soit pas retournée, autrement dit qu'elle soit orientée toujours par le même côté par rapport aux pôles. Au lieu de retirer la bobine on peut la laisser en place, mais couper le courant dans l'enroulement : il en résultera également une déviation de l'aiguille du millivoltmètre dans le sens qui est déterminé par la polarité du pôle. En vertu de la loi de Lenz, le sens du courant dans la bobine d'essai (fig. 3, *b*) sera le même que celui du courant dans l'enroulement inducteur avant sa coupure. Si l'introduction de la bobine dans l'entrefer entre les pôles s'avère impossible à réaliser, la bobine peut être approchée, de même que dans le procédé de l'aiguille magnétique, au contact des boulons de fixation des inducteurs sur la carcasse. Dans ce dernier cas, pour obtenir des résultats satisfaisants il est nécessaire soit de faire circuler dans l'enroulement un courant plus intense que dans le premier cas, soit d'employer une bobine d'essai comportant un plus grand nombre de spires.

Les procédés qui viennent d'être décrits permettent également de vérifier si la polarité de l'enroulement série est correcte par rapport à celle de l'enroulement dérivation. A cet effet, chacun de ces enroulements est alimenté avec un courant continu de sens connu et, en procédant à des essais correspondants, on compare les résultats obtenus pour chaque pôle.

On peut s'assurer du bon couplage de l'enroulement série par

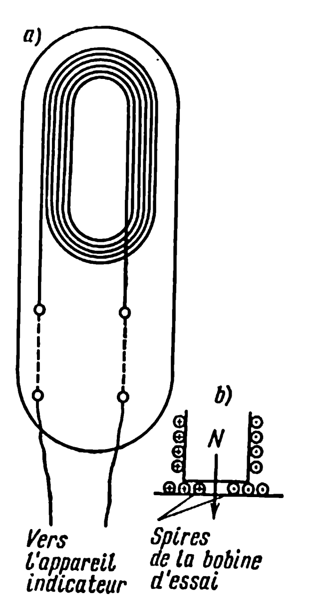


Fig. 3. Bobine d'essai :
a : disposition des spires ; *b* : sens du courant dans la bobine d'essai

rapport à l'enroulement dérivation placé sur le même noyau polaire que l'enroulement série, si l'on connaît les bornes de même nom de ces enroulements. A cet effet, on met sous tension l'un des enroulements (fig. 4). A l'instant de fermeture de l'interrupteur, une f.é.m., dont le sens peut être déterminé avec un voltmètre, est induite dans le deuxième enroulement. Quand les deux enroulements sont bobinés dans le même sens, la déviation de l'aiguille du voltmètre à l'instant de fermeture de l'interrupteur sera positive (vers la droite, à partir de zéro), si la borne positive de la source d'alimentation (de la batterie d'accumulateurs) et la borne positive du voltmètre sont reliées aux bornes de même nom des enroulements série et dérivation.

Il faut ne pas perdre de vue que pour prévenir un renversement d'aimantation, il est nécessaire dans tous les cas

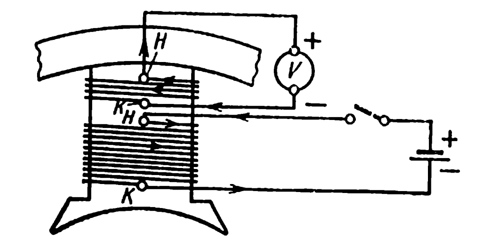


Fig. 4. Vérification du couplage correct de l'enroulement série par rapport à l'enroulement dérivation

d'alimentation avec un courant des dynamos à auto-excitation, de brancher le pôle positif du réseau sur les bornes correspondantes des enroulements inducteurs série et dérivation.

2. Vérification des connexions correctes des extrémités des enroulements. A cet effet, il faut rechercher les entrées et les sorties des enroulements des pôles principaux et auxiliaires, la polarité de ces derniers étant connue. Avec ces données et connaissant la polarité de l'induit (des balais) il n'est pas difficile d'établir si les connexions des enroulements sont bonnes pour le sens de rotation voulu de la machine.

S'il est possible de procéder à un démarrage d'essai de la machine en la faisant fonctionner soit en génératrice soit en moteur, on peut déterminer les connexions correctes des bornes, même dans le cas où la polarité de l'induit n'est pas recherchée et l'on ne connaît que l'alternance des pôles

principaux et des pôles de commutation suivant le sens du courant dans leurs enroulements.

En faisant fonctionner la machine comme génératrice, lors d'un démarrage d'essai, il n'est nullement nécessaire de la porter à sa vitesse nominale, il suffit simplement de tourner son induit (au moyen d'un levier ou d'une grue) après avoir appliqué la tension d'excitation. Connaissant la polarité des bornes de l'enroulement inducteur et ayant recherché à l'aide d'un appareil de mesure magnéto-électrique, la polarité des balais, on peut déterminer, le sens de rotation de l'induit étant connu, les couplages corrects de tous les enroulements. Pour le démarrage d'essai de la machine comme moteur on la met brusquement en route, la résistance totale du rhéostat de démarrage étant mise en circuit, et on détermine son sens de rotation. Connaissant la polarité des balais et celle des bornes de l'enroulement inducteur, on peut également déterminer comment doivent être connectées les bornes de tous les enroulements pour faire marcher la machine dans le sens désiré.

Si un tel démarrage d'essai de la machine ne peut pas être effectué, la polarité des bornes de l'induit pourra être recherchée à l'aide d'un des procédés décrits ci-dessous.

Détermination de la polarité d'après le type d'enroulement. Lorsqu'on connaît le type d'enroulement d'induit, la polarité des pôles et le sens de rotation de l'induit, sa polarité peut être déterminée à l'aide de la fig. 5, dans laquelle le sens de rotation est indiqué pour un observateur placé face au bout d'arbre, s'il n'en existe qu'un ou du côté opposé au collecteur, s'il existe deux bouts d'arbre. Avec la forme habituellement adoptée pour les têtes des bobines, les balais sont positionnés sur le collecteur en face des milieux des pôles principaux.

Dans le cas où le type d'enroulement d'induit est inconnu et l'on n'arrive pas à l'identifier par examen externe, la polarité de l'induit peut être quand même déterminée à l'aide de la fig. 5 s'il y a possibilité d'alimenter l'enroulement d'induit en courant continu.

Recherche de la polarité de l'induit par le procédé d'alimentation en courant continu. Lorsqu'un induit immobile est alimenté en courant continu à travers les balais, les pôles auxiliaires étant mis hors circuit, il produit entre les pôles principaux, au milieu, un champ magnétique dont le sens dépendra de la polarité de l'induit et du type d'enroulement.

Si c'est un enroulement du groupe I (voir fig. 5) qui est alimenté en courant continu, le pôle nord N du champ d'induit sera disposé à gauche et le pôle sud S à droite

Type d'enroulement	Groupe	Polarité du balai en face du pôle nord			
		génératrice		moteur	
		à droite	à gauche	à droite	à gauche
1. Enroulement imbriqué non croisé, à radiales de collecteur normales 2. Enroulement imbriqué croisé, à connexions équipotentielles aux radiales de collecteur 3. Enroulement ondulé non croisé	I	↑ +	↓ −	↓ +	↑ −
4. Enroulement imbriqué croisé, à radiales de collecteur normales 5. Enroulement imbriqué non croisé, à connexions équipotentielles aux radiales de collecteur 6. Enroulement ondulé croisé	II	↓ −	↑ +	↑ −	↓ +

Fig. 5. Polarité des bornes de l'induit suivant le type d'enroulement

(fig. 6) du pôle positif de la source d'alimentation (si l'on regarde l'induit du côté collecteur). Lorsque l'enroulement d'induit qu'on alimente en courant continu fait partie du groupe II, le pôle nord du champ d'induit sera disposé à droite et le pôle sud à gauche du pôle positif de la source d'alimentation.

La polarité du champ d'induit peut être également établie à l'aide d'une aiguille aimantée ou d'une bobine d'essai (fig. 3, a), en plaçant cette dernière au milieu entre les pôles principaux et en coupant le courant d'alimentation de l'induit.

Vérification du couplage correct de l'enroulement des pôles auxiliaires par rapport à l'induit. On fait circuler dans l'induit un courant continu ayant une intensité non supérieure à 10 % de la valeur nominale, on débranche l'enroulement inducteur, l'enroulement des pôles auxiliaires n'étant pas mis en circuit (fig. 7). On introduit la bobine d'essai reliée à un millivoltmètre (fig. 3, *a*) dans l'entrefer entre l'un des pôles auxiliaires et l'induit, on interrompt le

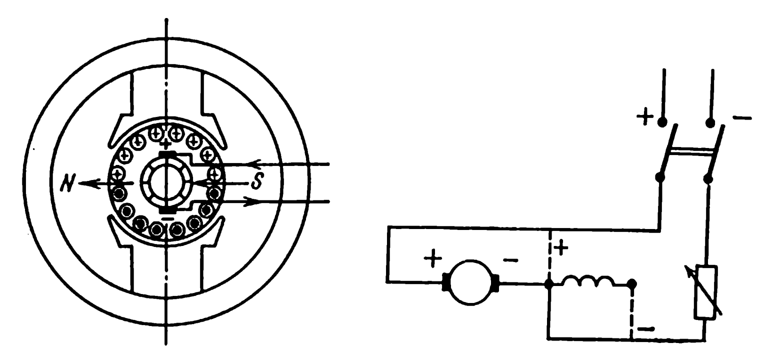


Fig. 6. Champ produit par un induit alimenté en courant

Fig. 7. Vérification du couplage correct de l'enroulement des pôles auxiliaires en cas d'alimentation avec un courant continu

courant en ouvrant l'interrupteur et on observe le sens dans lequel dévie l'aiguille du millivoltmètre. Ensuite, en laissant la bobine d'essai dans la même position entre le pôle auxiliaire et l'induit, on branche l'enroulement des pôles auxiliaires comme il est indiqué en pointillé sur la fig. 7; il en résulte la mise hors tension de l'enroulement de l'induit.

Si, à l'instant de coupure de courant, l'aiguille de l'appareil dévie dans le sens opposé à sa déviation lors de la coupure de courant dans le premier cas, c'est l'indice que l'enroulement des pôles de commutation est branché correctement. Cela tient au fait qu'en cas de couplage correct de l'enroulement des pôles auxiliaires le flux magnétique émanant de ces derniers doit être en opposition avec le flux magnétique produit par l'induit.

Dans une machine comportant un enroulement de compensation, cet essai peut être effectué en branchant l'enrou-

lement des pôles auxiliaires ensemble avec l'enroulement de compensation : si ce dernier est connecté correctement avec l'enroulement des pôles auxiliaires, cet essai permet de s'assurer du couplage correct de l'induit par rapport aux deux enroulements à la fois.

Si l'on ne dispose pas de source à courant continu, le couplage correct de l'enroulement des pôles auxiliaires et de l'enroulement de compensation par rapport à l'induit peut être contrôlé à l'aide d'un courant alternatif [8] emprunté, par exemple, au réseau d'éclairage. A cet effet, il convient de faire passer le courant par un rhéostat ou d'avoir recours à un transformateur de soudage ou à un transformateur d'éclairage à tension de sécurité. On réalise le montage de la

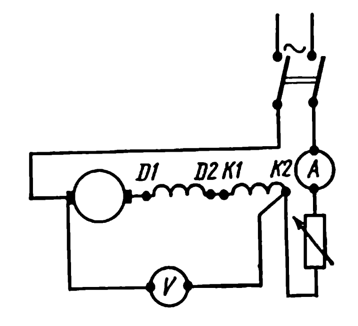


Fig. 8. Vérification du couplage correct de l'enroulement des pôles auxiliaires et de l'enroulement de compensation en cas d'alimentation avec un courant alternatif;
Д1 et Д2: entrée et sortie de l'enroulement des pôles auxiliaires; K1 et K2: entrée et sortie de l'enroulement de compensation

fig. 8 et on procède comme suit : on branche les enroulements, indiqués plus haut, en série avec l'induit et, en les mettant sous tension alternative, on détermine, à l'aide d'un ampèremètre et d'un voltmètre la résistance totale offerte par ce circuit au courant alternatif. Cette mesure peut être effectuée pour une faible intensité de courant. Ensuite on met l'enroulement des pôles auxiliaires, ensemble avec l'enroulement de compensation, en série avec l'induit, de manière que le courant les traverse en sens opposé, et on mesure de nouveau la résistance totale de ce circuit.

Le couplage correct des enroulements est celui pour lequel la résistance totale du circuit a la plus faible valeur. Ceci tient à ce qu'en cas de connexion correcte sur l'induit des enroulements des pôles auxiliaires ensemble avec l'enroulement de compensation, le champ magnétique de l'induit est opposé au champ produit par les pôles auxiliaires et l'enroulement de compensation. Or, la résistance en

courant alternatif des enroulements mis en série est plus faible lorsqu'ils produisent des flux opposés que s'ils développent des flux agissant dans le même sens.

B. Machines à courant alternatif

La vérification des connexions correctes des enroulements triphasés se ramène à reconnaître les entrées et les sorties de chaque phase. Les entrées et les sorties des phases peuvent être identifiées à l'aide d'un millivoltmètre. A cet effet, on recherche tout d'abord, au moyen d'un mégohmmètre ou d'une lampe témoin, les extrémités des enroulements de chaque phase. Ensuite, l'enroulement de l'une des phases

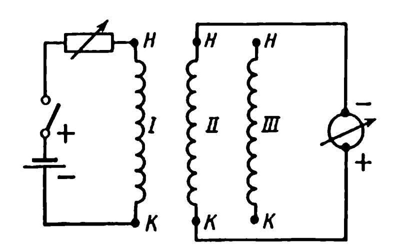


Fig. 9. Vérification du couplage correct des extrémités des enroulements triphasés; H: entrée; K: sortie

est branché, par l'intermédiaire d'un interrupteur (fig. 9) et d'un rhéostat, sur une source de courant continu telle que le courant dans l'enroulement soit peu intense (il est préférable d'employer un élément accumulateur de 2 V).

La fermeture et l'ouverture de l'interrupteur a pour effet d'induire dans les enroulements de deux autres phases des forces électromotrices dont le sens peut être déterminé au millivoltmètre. Si l'extrémité supposée « entrée » est reliée au pôle positif de la batterie d'alimentation et l'extrémité supposée « sortie » à son pôle négatif, l'ouverture de l'interrupteur produira dans les autres phases des forces électromotrices de sens tels que leurs « entrées » seront portées à un potentiel positif et leurs « sorties » à un potentiel négatif, ce qu'on peut constater à l'aide d'un millivoltmètre en le branchant alternativement entre les bornes des deux autres phases. A la fermeture de l'interrupteur, les extrémités des autres phases auront la polarité opposée à celle qu'on constate à l'ouverture de l'interrupteur.

Dans le cas où la machine possède trois bornes (couplage en étoile ou en triangle), le couplage correct des phases peut être vérifié, en branchant entre deux bornes une source de courant alternatif à tension réduite et en mesurant avec un voltmètre la tension entre la troisième borne et chacune des deux bornes reliées au réseau.

Le couplage des phases est correct, si ces tensions sont égales à la moitié de la tension appliquée entre deux bornes, ce rapport des tensions restant le même quelles que soient ces deux bornes branchées sur le réseau d'alimentation.

Cette expérience doit être effectuée à trois reprises, en appliquant la tension chaque fois à une autre paire de bornes. En cas d'une erreur de couplage de l'une des phases, la tension entre la troisième borne et chacune de deux autres sera différente dans deux expériences sur trois.

Pour protéger les enroulements contre un échauffement anormal possible, dans le cas d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil, cette expérience doit s'effectuer sous une tension de l'ordre de 1/5 à 1/6 de la valeur nominale et, dans le cas d'un moteur asynchrone à rotor bobiné, seulement après avoir interrompu le circuit de son enroulement.

ANNEXE 3

Repérage des bornes. Groupes de couplage et mise en phase des transformateurs triphasés à deux enroulements

A. Repérage des bornes et groupes de couplage

D'après les Normes soviétiques GOST 11677-65, les entrées des enroulements d'un transformateur monophasé à deux enroulements sont repérées par les lettres A et a et les sorties par les lettres X et x. Dans les transformateurs triphasés à deux enroulements, les entrées et les sorties des enroulements sont repérées respectivement par les lettres A, B, C; a, b, c et X, Y, Z; x, y, z. Les grandes lettres sont affectées aux enroulements à haute tension et les petites, aux enroulements à basse tension.

En cas de couplage en étoile, les bornes neutres sont repérées par 0 et o.

Les notions d'entrée et de sortie d'un enroulement sont arbitraires.

La disposition normalisée des bornes sur le couvercle des transformateurs à deux enroulements est montrée sur la fig. 1.

Dans les transformateurs triphasés on utilise les couplages des enroulements suivants: Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z, Y/Δ, Δ/Y et Y/Z (Y : couplage en étoile; Δ : couplage en triangle; Z : couplage en zigzag; le nominateur indique le mode de couplage de l'enroulement à haute tension et le dénominateur, celui de l'enroulement à basse tension).

Ces schémas des connexions permettent d'obtenir douze groupes de couplage différents avec un déphasage entre les

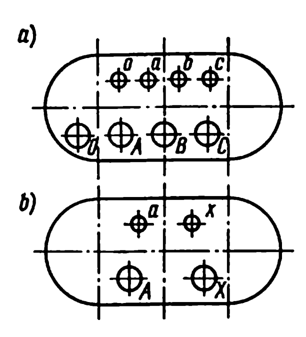


Fig. 1. Repérage des bornes sur le couvercle d'un transformateur à deux enroulements:
a: transformateur triphasé d'une puissance de 5 à 5 600 kVA et de haute tension jusqu'à 35 kV; *b*: transformateurs monophasés de toutes puissances nominales et de toutes tensions

f.é.m. primaires et secondaires variant de 0 à 330 °C, de 30° en 30°. Il a été convenu de caractériser ce déphasage par la position des aiguilles d'une horloge, le vecteur f.é.m. dans l'enroulement à haute tension étant confondu avec la grande aiguille qui est toujours positionnée sur sa graduation 12 et le vecteur f.é.m. dans l'enroulement à basse tension correspondant à la petite aiguille, dont la position dépend du déphasage entre les f.é.m. dans les deux enroulements. C'est ainsi par exemple que le déphasage 0° correspond à midi (les deux aiguilles sont sur la graduation 12) et le groupe de couplage est désigné par l'indice numérique 12; au déphasage de 180° correspond le groupe 6.

Les schémas de couplage Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z peuvent former des groupes de couplage pairs: 2, 4, 6, 8, 10, 12, et les schémas Y/Y, Δ/Y, Y/Z des groupes de couplage impairs: 1, 3, 5, 7, 9, 11. Les groupes 12 et 6 sont des groupes pairs principaux et les groupes 11 et 5 sont des groupes impairs principaux.

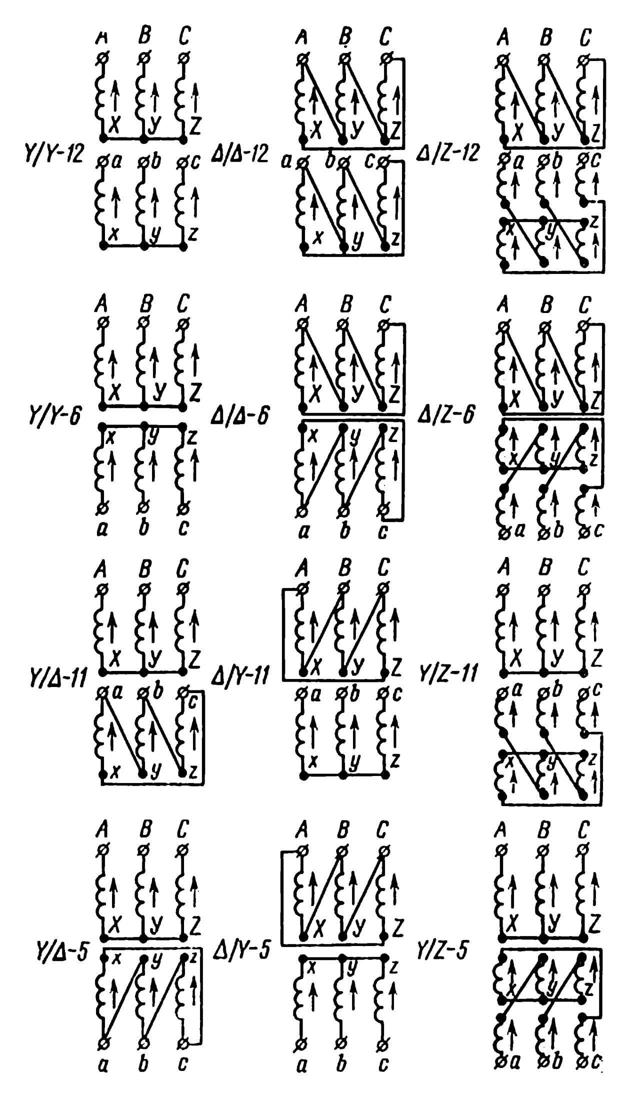


Fig. 2. Schémas des connexions correspondant aux principaux groupes de couplage des enroulements des transformateurs triphasés et repérage des bornes

Groupes pairs

Groupe	Déphasage	Diagramme vectoriel des f.e.m. entre phases	Repérage des bornes
(12)	0°	B b A a c C	A B C a b c
4	120°	B A C a c b	A B C c a b
8	240°	c B A b C a	A B C b c a
(6)	180°	B A c C a c	A B C a b c
10	300°	B c b a A C	A B C c a b
2	60°	B A C a b c	A B C b c a

Groupes impairs

Groupe	Déphasage	Diagramme vectoriel des f.e.m. entre phases	Repérage des bornes
(11)	330°	B b c a A C	A B C a b c
3	90°	B A a b C c	A B C c a b
7	210°	B c A C a b	A B C b c a
(5)	150°	B A C c a b	A B C a b c
9	270°	B c b a A C	A B C c a b
1	30°	B b A C a c	A B C b c a

Fig. 3. Tableau récapitulatif des groupes de couplage des enroulements des transformateurs triphasés

La fig. 2 montre les schémas des principaux groupes de couplage des transformateurs; les enroulements placés sur une même colonne sont représentés l'un au-dessous de l'autre, les sens des f.é.m. sont indiqués par des flèches. Les autres groupes sont des groupes dérivés; ils sont obtenus par un changement circulaire du marquage des bornes, sans modifier les connexions internes (fig. 3). A partir du groupe 12 sont formés les groupes 4 et 8, à partir du groupe 6, les groupes 10 et 2 et à partir des groupes 11 et 5, respectivement les groupes 3, 7 et 9, 11.

En U.R.S.S., on a normalisé (GOST 12022-77, 11920-73) les groupes de couplage Y/Y$_0$-12, Y/Δ-11, Y$_0$/Δ-11 avec, au besoin, neutre sorti de l'étoile.

B. Détermination expérimentale des groupes de couplage

Si l'indication du groupe de couplage manque sur la plaque signalétique, on peut le déterminer expérimentalement à l'aide d'un voltmètre. A cet effet il convient de procéder comme suit : relier par une barette deux bornes homologues de basse tension et de haute tension (par exemple les bornes A et a) ; appliquer à l'enroulement basse tension une tension symétrique triphasée de valeur réduite (fig. 4) et effectuer la mesure des tensions U_{bB}, U_{cC}, U_{cB} entre les bornes $b—B$ et $c—C$ et $c—B$. Les tensions U_{bB} et

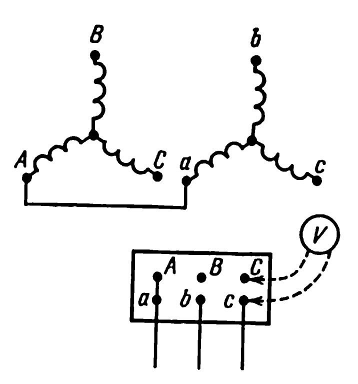


Fig. 4. Montage pour déterminer le groupe de couplage d'un transformateur

U_{cC} doivent être identiques. Ensuite, on détermine si la tension U_{cB} est égale (é), supérieure (s) ou inférieure (i) à la tension U_{bB} et on détermine à l'aide du tableau 1 le groupe de couplage. Si le résultat des mesures ne correspond à aucun groupe indiqué dans le tableau, c'est l'indice que le marquage des enroulements a été effectué dans des ordres différents (par exemple, $A—B—C$ et $a—c—b$).

En cas des rapports de transformation élevés, ce procédé de détermination du groupe de couplage peut conduire à une erreur. Dans de tels cas, il est recommandé de brancher sur l'enroulement à haute tension un transformateur abaisseur, appartenant au groupe de couplage 12 et d'utiliser, lors des mesures, au lieu des bornes A, B et C les bornes secondaires a, b et c du transformateur abaisseur. Les groupes de couplage peuvent être également déterminés à l'aide d'autres procédés, par exemple, au moyen d'un phasemètre, d'un wattmètre ou d'un indicateur de polarité.

Groupe de couplage	$U_{b_B} = U_{cC}$	U_{cB}
12	$k-1$	—
1	$\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$	s
2	$\sqrt{k^2-k+1}$	s
3	$\sqrt{k^2+1}$	s
4	$\sqrt{k^2+k+1}$	s
5	$\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	é
6	$k+1$	—
7	$\sqrt{k^2+k\sqrt{3}+1}$	i
8	$\sqrt{k^2+k+1}$	i
9	$\sqrt{k^2+1}$	i
10	$\sqrt{k^2-k+1}$	i
11	$\sqrt{k^2-k\sqrt{3}+1}$	é

Note. k est le rapport de la tension composée haute à la tension composée basse.

C. Mise en parallèle des transformateurs de groupes différents

Pour la mise en parallèle des transformateurs triphasés, il est nécessaire que leurs groupes de couplage soient identiques. La marche en parallèle des transformateurs est possible dans quatre cas indiqués ci-dessous.

1. Pour les mêmes groupes de couplage des enroulements.

2. Entre les groupes de couplage principaux et les groupes dérivés, c'est-à-dire entre les groupes 12, 4, 8, 6, 10, 2; et 11, 3, 7, 5, 9, 1, étant donné que par un changement circulaire du repérage des bornes, un groupe de couplage peut être transformé en un autre. Pour la mise en parallèle il est nécessaire de relier les bornes dans l'ordre indiqué dans le tableau 2.

Les colonnes verticales de ce tableau indiquent les bornes qui doivent être connectées en cas de mise en parallèle des transformateurs appartenant aux groupes de couplage principal et dérivé.

3. Entre les groupes 11, 3, 7 et respectivement les groupes 5, 9, 1. Dans le tableau 3 est indiqué l'ordre de connexion des bornes pour le cas de la mise en parallèle d'un transformateur appartenant au groupe 5 et d'un transformateur de groupe 11.

4. Entre les groupes impairs avec un déphasage de 60° des vecteurs des tensions secondaires, par exemple, entre les groupes 1 et 11. A cet effet, il est nécessaire d'inverser,

Tableau 2

Groupe de couplage				Enroulements haute tension			Enroulements basse tension		
12	6	11	5	*A*	*B*	*C*	*a*	*b*	*c*
4	10	3	9	*A*	*B*	*C*	*c*	*a*	*b*
8	2	7	1	*A*	*B*	*C*	*b*	*c*	*a*

dans le transformateur de groupe 1, deux quelconques des phases du côté de la haute tension et les phases homologues du côté de la basse tension.

La mise en parallèle des transformateurs appartenant à des groupes pairs et des transformateurs de groupes impairs

Tableau 3

Groupe de couplage	Enroulements haute tension			Enroulements basse tension		
11	*A*	*B*	*C*	*a*	*b*	*c*
5	*A*	*C*	*B*	*c*	*b*	*a*
	C	*B*	*A*	*b*	*a*	*c*
	B	*A*	*C*	*a*	*c*	*b*

est inadmissible puisque dans ce cas le changement des connexions ne peut pas transformer un groupe en un autre.

La mise en parallèle des transformateurs des groupes 12, 4 et 8 avec des transformateurs appartenant respective-

ment aux groupes 6, 10 et 2 n'est possible qu'en intervertissant les entrées et les sorties des enroulements primaire et secondaire de l'un des transformateurs. Cette opération exige de sortir le circuit magnétique et de ressouder les enroulements.

La possibilité de mise en parallèle des transformateurs de groupes impairs 11, 3 et 7 avec des transformateurs de

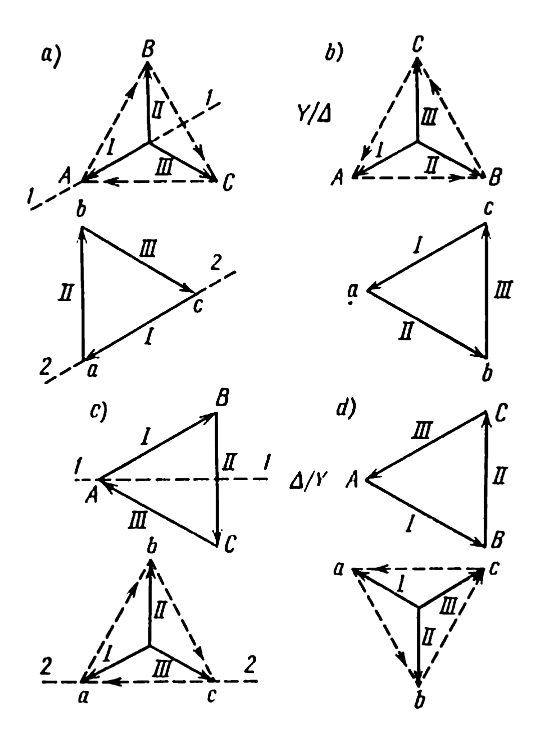


Fig. 5. Explication de la possibilité de mise en parallèle des transformateurs appartenant à des groupes de couplage impairs

groupes impairs respectivement 5, 9 et 1 ou du groupe 1 avec le groupe 11 peut être explicitée comme suit :

Lorsqu'on inverse deux phases quelconques de l'enroulement primaire, par exemple, les phases B et C, les diagrammes vectoriels des f.é.m. primaires tournent aussi bien dans le cas du couplage Y/Δ (fig. 5, *a* et *b*) que dans le cas

du couplage Δ/Y (fig. 5, *c* et *d*), de 180° par rapport à l'axe *1-1* perpendiculaire au vecteur f.é.m. *BC*, alors que les diagrammes vectoriels des f.é.m. secondaires tournent de 180° par rapport à l'axe *2—2* parallèle à l'axe *1—1*.

En cas d'inversion de deux phases de l'enroulement primaire, la disposition relative des diagrammes vectoriels des f.é.m. dans les deux enroulements du transformateur reste inchangée : ce n'est que l'ordre de succession des phases qui change dans les deux enroulements.

En outre, dans les deux cas considérés, l'inversion de deux phases de l'enroulement primaire fait tourner le vecteur de la tension composée (*ab*) de 120° dans le sens de rotation des vecteurs et l'autre vecteur (*bc*) de 120° dans le sens opposé à la rotation des vecteurs.

Si, après cela, on inverse deux phases de l'enroulement secondaire, *ca*, par exemple, l'un des vecteurs (*bc*) de la tension composée tournera de 60° dans le sens de rotation des vecteurs alors que l'autre (*ab*) tournera de 60° dans le sens opposé à la rotation des vecteurs, si bien que le sens de rotation des vecteurs de la tension secondaire devient le même qu'auparavant.

C'est ainsi qu'en inversant deux phases de l'enroulement primaire et deux phases de l'enroulement secondaire, il devient possible de modifier de $\pm 120°$ et de $\pm 60°$ la phase des f.é.m. secondaires des transformateurs appartenant aux groupes de couplage impairs.

Considérons à titre d'exemple le cas de commutation des enroulements d'un transformateur de groupe Y/Δ-5 pour sa mise en parallèle avec un transformateur de groupe Y/Δ-11 (fig. 6, *a*). Les fig. 6, *b*, *c* et *d* montrent la construction des diagrammes vectoriels. En cas d'inversion des phases *B* et *C*, les vecteurs des f.é.m. de l'enroulement primaire tournent de 180° autour de l'axe *1-1* et les vecteurs des f.é.m. secondaires, autour de la ligne *ac* (fig. 6, *b* et *c*) ; en cas d'inversion des phases *c* et *a*, les vecteurs des f.é.m. secondaires du transformateur tournent de 180° autour de l'axe *2-2*.

C'est ainsi que le triangle des vecteurs des f.é.m. secondaires (fig. 6, *d*) se confond avec le triangle homologue du transformateur Y/Δ-11 (fig. 6, *a*) ; le sens de rotation est le même pour ces deux vecteurs.

Le schéma du changement des connexions est représenté par la fig. 6, *e*.

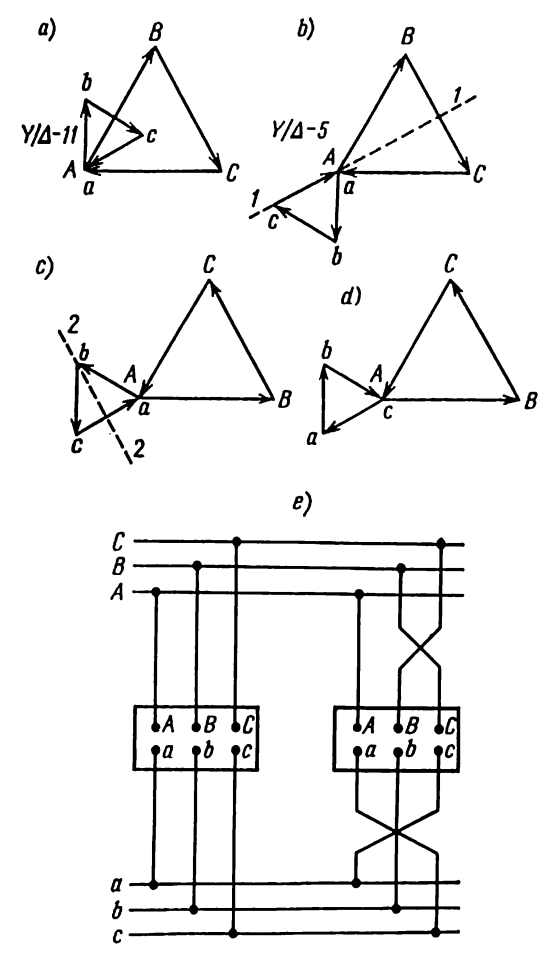


Fig. 6. Diagrammes vectoriels et schémas des connexions des bornes pour la mise en parallèle des transformateurs appartenant aux groupes Y/△-5 et Y/△-11

D. Mise en phase des transformateurs

Le couplage d'un transformateur pour la marche en parallèle après son montage ainsi qu'après des travaux au cours desquels la mise en phase a pu être troublée (révision générale comportant le changement des enroulements, débranchement des câbles, pose d'un nouveau câble, etc.) n'est admissible qu'après une mise en phase préliminaire, c'est-à-dire après avoir vérifié la concordance en phase des tensions secondaires des deux transformateurs alimentés par le même réseau primaire.

Lors de la mise en phase, on vérifie la symétrie des tensions (séparément pour le côté haute tension et celui basse

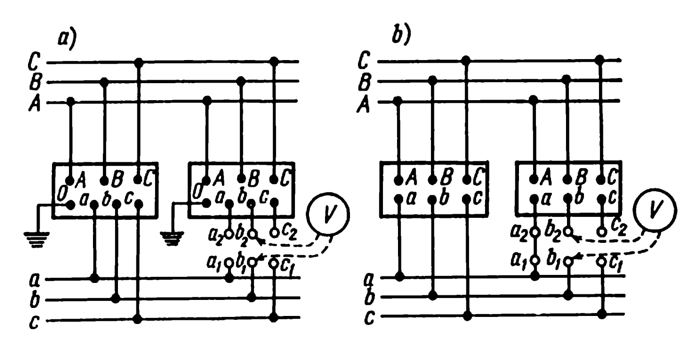


Fig. 7. Mise en phase des transformateurs:
a: avec neutres mis à la terre; *b*: avec neutres isolés

tension) et on trouve des paires de bornes entre lesquelles les différences de tension sont nulles.

Dans ce qui suit nous ne décrivons que l'opération de mise en phase des transformateurs dont la basse tension n'excède pas 380 V. Dans de tels transformateurs, la mise en phase n'est assurée que du côté de la basse tension.

Dans les enroulements à basse tension, on doit au préalable relier par une barrette deux bornes quelconques en vue d'obtenir un circuit fermé. Dans les transformateurs à neutre mis à la terre une telle connexion est constituée par celle des points neutres à travers la terre (aucune autre connexion ne doit se faire étant donné que la liaison entre deux phases non homologues constitue un court-circuit).

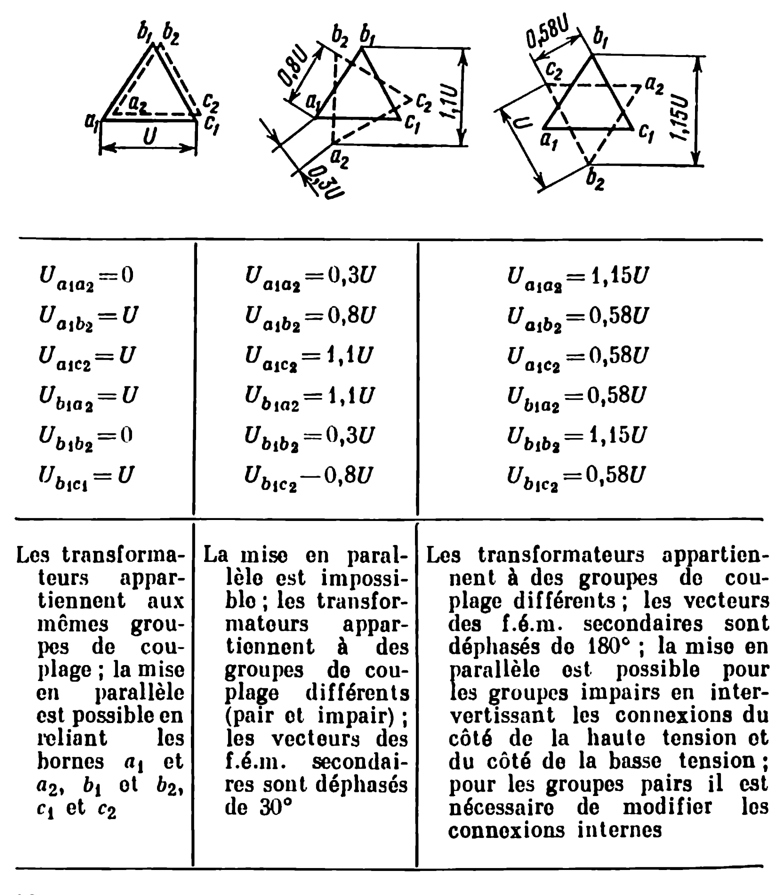
Si les points neutres mis à la terre manquent dans les deux transformateurs, on relie au moyen d'une barrette

deux bornes quelconques des transformateurs à vérifier. Les transformateurs sont alimentés du côté de la haute tension. Les schémas des connexions sont donnés pour les deux cas sur la fig. 7.

Lors de la mise en phase des transformateurs à neutre mis à la terre (fig. 7, *a*), on mesure la tension entre la borne a_1 et trois bornes a_2, b_2, c_2 ainsi qu'entre la borne b_1 et ces trois bornes indiquées.

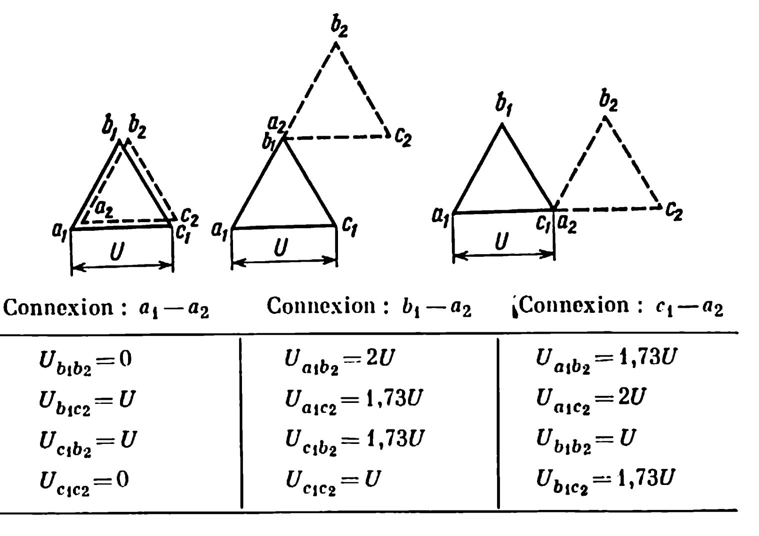
Tableau 4

Diagrammes vectoriels des tensions lors de la mise en phase des transformateurs à neutre mis à la terre



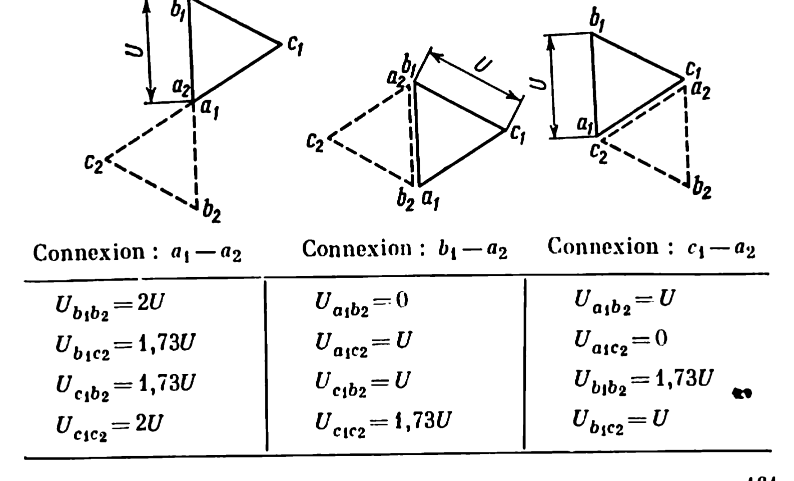
$U_{a_1a_2}=0$ $U_{a_1b_2}=U$ $U_{a_1c_2}=U$ $U_{b_1a_2}=U$ $U_{b_1b_2}=0$ $U_{b_1c_1}=U$	$U_{a_1a_2}=0{,}3U$ $U_{a_1b_2}=0{,}8U$ $U_{a_1c_2}=1{,}1U$ $U_{b_1a_2}=1{,}1U$ $U_{b_1b_2}=0{,}3U$ $U_{b_1c_2}-0{,}8U$	$U_{a_1a_2}=1{,}15U$ $U_{a_1b_2}=0{,}58U$ $U_{a_1c_2}=0{,}58U$ $U_{b_1a_2}=0{,}58U$ $U_{b_1b_2}=1{,}15U$ $U_{b_1c_2}=0{,}58U$
Les transformateurs appartiennent aux mêmes groupes de couplage ; la mise en parallèle est possible en reliant les bornes a_1 et a_2, b_1 et b_2, c_1 et c_2	La mise en parallèle est impossible ; les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents (pair et impair) ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 30°	Les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 180° ; la mise en parallèle est possible pour les groupes impairs en intervertissant les connexions du côté de la haute tension et du côté de la basse tension ; pour les groupes pairs il est nécessaire de modifier les connexions internes

Diagrammes vectoriels des tensions lors de la mise en phase des transformateurs sans neutre mis à la terre



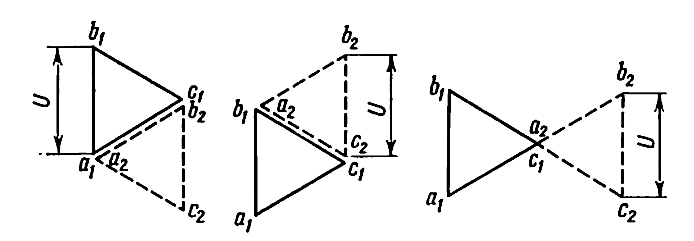
Connexion : $a_1 — a_2$	Connexion : $b_1 — a_2$	Connexion : $c_1 — a_2$
$U_{b_1b_2} = 0$	$U_{a_1b_2} = 2U$	$U_{a_1b_2} = 1{,}73U$
$U_{b_1c_2} = U$	$U_{a_1c_2} = 1{,}73U$	$U_{a_1c_2} = 2U$
$U_{c_1b_2} = U$	$U_{c_1b_2} = 1{,}73U$	$U_{b_1b_2} = U$
$U_{c_1c_2} = 0$	$U_{c_1c_2} = U$	$U_{b_1c_2} = 1{,}73U$

Les transformateurs appartiennent aux mêmes groupes de couplage ; la mise en parallèle est possible en reliant entre elles les bornes a_1 et a_2, b_1 et b_2, c_1 et c_2.



Connexion : $a_1 — a_2$	Connexion : $b_1 — a_2$	Connexion : $c_1 — a_2$
$U_{b_1b_2} = 2U$	$U_{a_1b_2} = 0$	$U_{a_1b_2} = U$
$U_{b_1c_2} = 1{,}73U$	$U_{a_1c_2} = U$	$U_{a_1c_2} = 0$
$U_{c_1b_2} = 1{,}73U$	$U_{c_1b_2} = U$	$U_{b_1b_2} = 1{,}73U$
$U_{c_1c_2} = 2U$	$U_{c_1c_2} = 1{,}73U$	$U_{b_1c_2} = U$

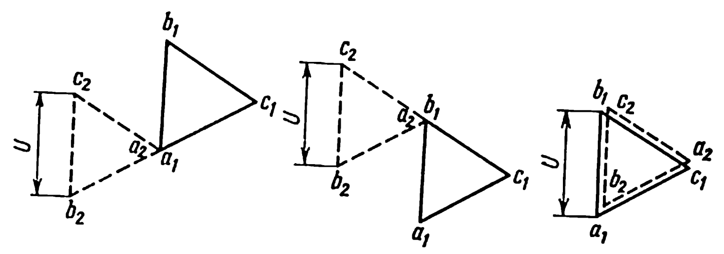
Les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 180° ; la mise en parallèle n'est possible que pour les groupes impairs en changeant les connexions du côté de la haute tension et du côté de a basse tension ; pour les groupes pairs il est nécessaire de changer es connexions internes des enroulements.



Connexion : $a_1 - a_2$ Connexion : $b_1 = a_2$ Connexion : $c_1 - a_2$

$U_{b_1b_2} = U$	$U_{a_1b_2} = 1{,}73U$	$U_{a_1b_2} = 2U$
$U_{b_1c_2} = 1{,}73U$	$U_{a_1c_2} = U$	$U_{a_1c_2} = 1{,}73U$
$U_{c_1b_2} = 0$	$U_{c_1b_2} = U$	$U_{b_1b_2} = 1{,}73U$
$U_{c_1c_2} = U$	$U_{c_1c_2} = 0$	$U_{b_1c_2} = 2U$

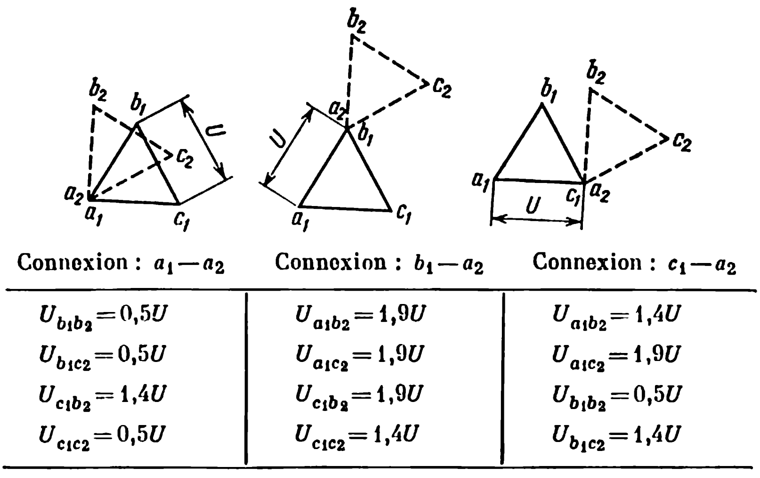
Les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 60° ; la mise en parallèle est possible pour les transformateurs de groupes impairs (par exemple, Y/Δ—11 et Y/Δ—1) par changement des connexions du côté de la basse tension et du côté de la haute tension.



Connexion : $a_1 - a_2$ Connexion : $b_1 - a_2$ Connexion : $c_1 - a_2$

$U_{b_1b_2}=1,73U$	$U_{a_1b_2}=U$	$U_{a_1b_2}=0$
$U_{b_1c_2}=U$	$U_{a_1c_2}=1,73U$	$U_{a_1c_2}=U$
$U_{c_1b_2}=2U$	$U_{c_1b_2}=1,73U$	$U_{b_1b_2}=U$
$U_{c_1c_2}=1,73U$	$U_{c_1c_2}=2U$	$U_{b_1c_2}=0$

Les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 120° ; la mise en parallèle est possible par changement des connexions du côté de la haute tension et du côté de la basse tension.



Connexion : a_1-a_2 Connexion : b_1-a_2 Connexion : c_1-a_2

$U_{b_1b_2}=0,5U$	$U_{a_1b_2}=1,9U$	$U_{a_1b_2}=1,4U$
$U_{b_1c_2}=0,5U$	$U_{a_1c_2}=1,9U$	$U_{a_1c_2}=1,9U$
$U_{c_1b_2}=1,4U$	$U_{c_1b_2}=1,9U$	$U_{b_1b_2}=0,5U$
$U_{c_1c_2}=0,5U$	$U_{c_1c_2}=1,4U$	$U_{b_1c_2}=1,4U$

La mise en parallèle est impossible ; les transformateurs appartiennent à des groupes de couplage différents (pair et impair) ; les vecteurs des f.é.m. secondaires sont déphasés de 30°.

Pendant la mise en phase des transformateurs sans neutre mis à la terre (fig. 7, *b*), on place une barrette successivement entre les bornes $a_2—a_1$, $a_2—b_1$, $a_2—c_1$ et on mesure la tension entre les quatre paires des autres bornes.

En utilisant les résultats de ces mesures, on construit de diagrammes vectoriels et, d'après ces derniers, on juge de la possibilité de mise en parallèle des transformateurs essayés.

Les tableaux 4 et 5 donnent les diagrammes vectoriels pour les divers cas de mise en phase avec appréciation des résultats des mesures.

Pour réaliser le couplage en parallèle des transformateurs il n'est pas nécessaire de déterminer au préalable leurs groupes de couplage, étant donné qu'au cours de la mise en phase il est possible d'établir si les transformateurs considérés peuvent fonctionner en parallèle et de déterminer les changements de connexion qu'il faut opérer pour un tel couplage.

ANNEXE 4

Réglage de la position des balais et de la couronne porte-balais dans les machines à courant continu. Entretien du collecteur, des bagues collectrices et des balais

Le calage correct des balais peut être obtenu par le positionnement correct de la couronne porte-balais et des porte-balais. Ces derniers doivent être montés sur les bras de la couronne porte-balais ou sur les consoles de manière que les balais soient disposés suivant un axe parallèle à

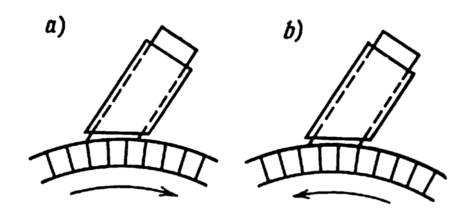


Fig. 1. Disposition d'un porte-balais à réaction: *a*: correcte; *b*: incorrecte

l'axe du collecteur. A cet effet, les porte-balais identiques doivent être mis en place suivant une règle placée parallèlement à l'axe du collecteur.

La position des porte-balais du type radial ne dépend pas du sens de rotation de l'induit. Le positionnement des porte-balais à réaction (inclinés de 30 à 40° par rapport à la verticale) dépend du sens de rotation de l'induit. Un balai à réaction est positionné correctement si son arête aiguë est orientée dans le sens opposé à la rotation, c'est-à-dire si cette arête est son arête d'entrée. La fig. 1, *a* montre la position correcte et la fig. 1, *b* la position incorrecte d'un porte-balais à réaction. Le sens de rotation de la machine est montré dans les deux cas par une flèche.

Les porte-balais inclinés (avec un angle d'inclinaison non supérieur à 15°) sont installés de manière que l'arête aiguë

du balai soit orientée dans le sens de rotation du collecteur c'est-à-dire que cette arête du balai est son arête de sortie.

Les balais doivent être placés sur la périphérie du collecteur de façon que les distances entre les arêtes de sortie des balais montés sur des consoles consécutives de la couronne porte-balais soient pratiquement les mêmes. Si cette condition n'est pas réalisée, on voit apparaître de forts crachements aux balais parce que, dans ce cas, les balais mettent en court-circuit des spires de l'enroulement légèrement décalées par rapport à la ligne neutre. Pour obtenir un placement correct des balais il convient de placer sur le

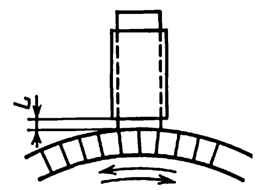


Fig. 2. Distance entre la gaine du porte-balais et la surface du collecteur

collecteur, sous les balais, une bande de papier divisée par traits en parties égales, conformément au nombre de consoles. La vérification de l'espacement régulier des balais sur la périphérie, en comptant le nombre de lames du collecteur, comprises entre les arêtes de sortie des balais des consoles voisines, est à déconseiller parce qu'un tel procédé n'est pas suffisamment précis. Le procédé de vérification avec une bande de papier permet d'obtenir entre les rangs voisins de balais des distances égales, à ±1 mm près, ce qui est suffisant pour assurer le fonctionnement normal de la machine.

La distance L entre la gaine du porte-balais et la surface du collecteur (fig. 2) doit être de 2,5 à 3 mm pour les grosses machines, de 1,5 à 2,5 mm pour les machines du type ПН28,5-ПН550 et près de 1 mm pour les machines du type ПН5-ПН17,5.

La cause d'étincelles abondantes aux balais peut être constituée par un jeu excessif entre le balai et sa gaine ou au contraire, par le coincement des balais dans leurs cages lors du fonctionnement de la machine. Le jeu normal entre le balai et sa gaine est compris entre 0,2 et 0,3 mm.

L'usure du collecteur étant inégale sous les balais positifs et négatifs, il faut, pour la rendre uniforme, que les balais de chaque paire de consoles voisines (un rang de balais posi-

tifs et un rang de balais négatifs) travaillent les uns après les autres (sur une piste de balais) et les balais de la paire suivante de consoles sur une autre piste, décalée, par rapport à la piste de la première paire, d'une distance *a*, etc. La mise en place des balais sur le collecteur est montrée sur la fig. 3, *a*. La valeur du recouvrement *a* doit être choisie de manière à assurer le frottement des balais sur toute la surface du collecteur. Dans les machines multipolaires, les balais peuvent être placés avec un décalage plus faible,

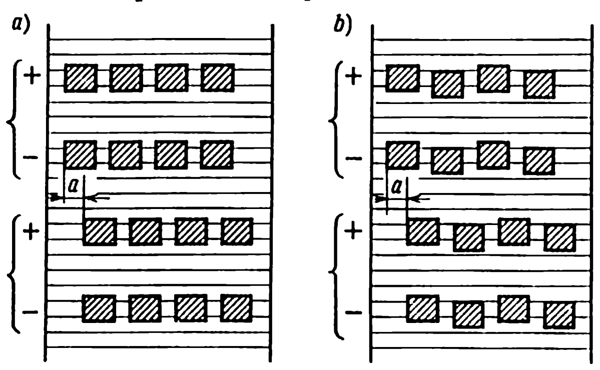


Fig. 3. Disposition des balais sur le collecteur:
a: lignes de balais en quinconce; *b*: lignes de balais en quinconce, balais étagés

mais à condition que le recouvrement complet des intervalles entre les balais soit assuré par le décalage total de plusieurs paires de consoles. La fig. 3, *b* montre la disposition étagée des balais dans les lignes qui est parfois utilisée dans les grosses machines.

En cas de déplacements axiaux de l'induit, les balais montés dans les porte-balais extrêmes ne doivent ni être en suspension au-dessus de la gorge circulaire du collecteur du côté de l'enroulement d'induit ni être en saillie au-delà de la face extérieure du collecteur.

La pression sur le balai produit par le ressort du porte-balais doit correspondre à la pression spécifique bien déterminée qui dépend de la nature et de la qualité des balais ainsi que de la vitesse circonférentielle du collecteur ou des bagues collectrices. Pour réduire les pertes mécaniques, on cherche à assurer une pression minimale sur le collecteur ou les bagues collectrices pour laquelle les balais fonctionnent

sans production d'étincelles. On devra également avoir en vue que la pression des balais doit être d'autant plus grande que la vitesse circonférentielle est plus élevée, pour que les balais puissent suivre toutes les irrégularités de la surface du collecteur ou des bagues et puissent fonctionner d'une façon satisfaisante en cas de vibrations possibles des porte-balais. La différence de pression sur les différents balais ne doit pas être supérieure à 10 % de la pression moyenne. La

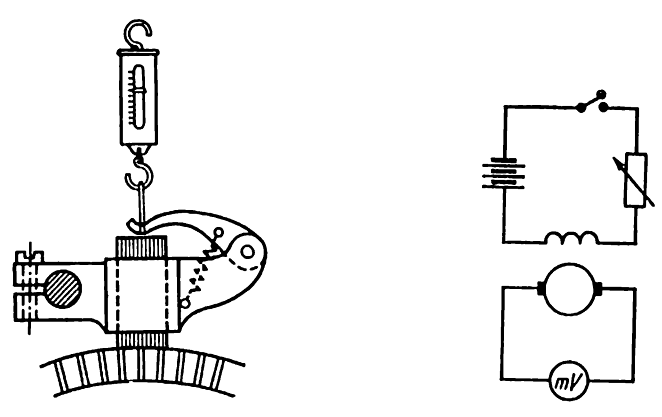


Fig. 4. Vérification au dynamomètre de la pression sur les balais

Fig. 5. Montage pour le réglage de la position de la couronne porte-balais

valeur de la pression des balais est vérifiée à l'aide d'un dynamomètre (fig. 4) fixé au levier du porte-balais qui appuie le balai sur le collecteur. La valeur de la pression peut être déterminée si l'on interpose, entre le balai et le collecteur, une feuille de papier et que l'on augmente la tension du dynamomètre: la lecture du dynamomètre pour laquelle le papier se retire facilement indique la pression du balai sur le collecteur.

Dans les machines à courant continu, les balais doivent être placés sur la ligne neutre. La position correcte de la couronne porte-balais est vérifiée par la méthode inductive, la machine étant arrêtée, après un rodage préalable des balais sur le collecteur. La couronne porte-balais est placée au préalable dans une position telle que la ligne de balais se trouve sensiblement en regard du milieu des pôles principaux (on a en vue les enroulements ordinaires à têtes des bobines

symétriques). L'enroulement d'excitation est débranché pour être connecté, par l'intermédiaire d'un rhéostat, sur une batterie d'accumulateurs (fig. 5). L'intensité du courant dans cet enroulement ne doit pas dépasser 5 à 10 % du courant nominal, ce qui est bien important pour éviter un claquage de l'enroulement sous l'effet des extra-courants d'ouverture. Aux bornes de l'induit on branche un millivoltmètre de 45 à 60 mV (de préférence à zéro central) avec une résistance additionnelle pour une tension de 1,5 à 3 V. Ensuite, on effectue la fermeture et l'ouverture du circuit d'excitation ; la f.é.m. de transformation, qui se trouve induite dans l'induit, fait dévier l'aiguille du millivoltmètre dans un sens ou dans l'autre suivant la position des balais par rapport à la ligne neutre. Lorsque les balais sont placés sur la ligne neutre, cette f.é.m. est pratiquement nulle. On déplace la couronne porte-balais jusqu'à obtenir cette position des balais.

Mieux vaut opérer d'après les indications du millivoltmètre à des instants d'interruption du circuit, étant donné que les lectures de l'appareil sont, dans ce cas, plus nettes alors que le sens de déviation de son aiguille permet, après quelques essais, de déterminer dans quel sens il faut déplacer la couronne porte-balais pour l'amener sur sa bonne position. Avant de procéder à ce réglage, le millivoltmètre doit être branché à travers une résistance additionnelle. Au fur et à mesure que la couronne s'approche de la bonnne position et les déviations de l'appareil diminuent, on passe à des calibres plus petits.

Il est recommandé de vérifier le réglage correct de la position de la couronne porte-balais pour les différentes positions de l'induit. Ce dernier doit être tourné dans un seul et même sens pour exclure l'influence qu'un déplacement possible des balais dans leurs gaines pourrait exercer sur les indications de l'appareil de mesure. On fixe la couronne porte-balais et on vérifie de nouveau sa position correcte. Après le rodage définitif des balais sur la surface du collecteur, on vérifie encore une fois la position de la ligne neutre.

Si la machine peut être mise en route, la position correcte de la couronne porte-balais peut être vérifiée en faisant fonctionner la machine en marche à vide, soit en générateur soit en moteur. Quand la machine fonctionne en générateur pour une résistance constante dans le circuit d'excitation et pour une vitesse de rotation constante, la tension aux

bornes de l'induit sera maximale lorsque les balais sont placés sur la ligne neutre. Si la machine fonctionne en moteur, à la position des balais sur la ligne neutre correspond la même vitesse de rotation dans les deux sens (en avant et en arrière) pour la même tension d'alimentation et le même courant d'excitation.

Le collecteur, les bagues collectrices et les balais demandent un entretien minutieux. Ces organes de la machine doivent être maintenus toujours en parfait état de propreté. Les plus nuisibles pour le bon fonctionnement de ces organes sont les farines métalliques et la poudre de charbon, bons conducteurs, qui se mélangent avec des lubrifiants tombant sur les surfaces de contact, en formant des impuretés et provoquant la production d'étincelles abondantes.

Le collecteur et les bagues collectrices peuvent être nettoyés, la machine étant en marche, à l'aide d'une plaquette de bois entourée d'un chiffon propre. En le faisant, il est impératif de prendre toutes les précautions de sécurité et notamment de s'isoler pour éviter tout contact avec les pièces sous tension et de ne pas frôler avec les mains ou les vêtements les parties tournantes de la machine.

Les balais en charbon doivent avoir un beau poli sur toute la surface de contact avec le collecteur ou les bagues collectrices. Les balais usés doivent être remplacés par des balais nouveaux de même qualité que ceux qui ont été mis en place par le constructeur.

Les balais doivent être rodés sur la surface du collecteur ou des bagues collectrices. A cet effet, on interpose sous les balais de 2 ou 3 consoles de la couronne porte-balais une bande de papier de verre, son côté abrasif étant orienté vers les balais, et on la déplace en avant et en arrière pour une pression normale des ressorts sur les balais.

L'emploi de toile émeri ou de toile de carborundum pour le rodage des balais est inadmissible. Pour assurer le rodage correct des balais, il convient de rabattre les extrémités de papier vers le bas (fig. 6, *a*), parce que le papier rabattu vers le haut (fig. 6, *b*) lime les bords des balais ce qui diminuera leur surface active et pourra donc provoquer la production d'étincelles au collecteur. Commencer le rodage des balais durs avec des papiers à gros grains abrasifs et passer ensuite au papier à grains fins. Pour le rodage des balais tendres on peut se servir, dès le début, de papier à grains fins. Après le rodage des balais, on procède au nettoya-

ge et au soufflage à l'air comprimé du collecteur, des bagues collectrices, des balais et des porte-balais pour éliminer la poudre de charbon et les grains de verre.

Pourtant, le nettoyage par une insufflation d'air comprimé provoque un transfert indésirable de la poussière d'une partie de la machine dans une autre, et pour l'éviter, il vaut mieux se servir, autant que possible, d'un aspirateur.

Les surfaces de contact du collecteur et des bagues collectrices doivent être rigoureusement cylindriques et présenter un beau poli sans aspérités ni rayures ou traces de brûlure ; les lamelles isolantes de mica ne doivent pas dépasser les lames du collecteur. Dans les machines à grande vitesse circonférentielle jusqu'à 50 m/s, les turbo-altérnateurs,

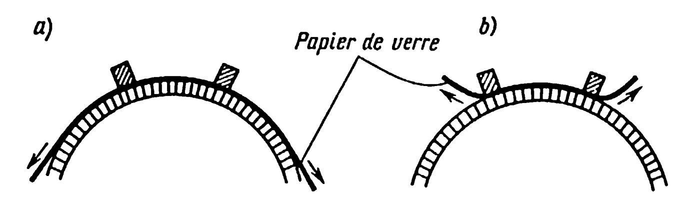


Fig. 6. Rodage des balais:
a: correct; *b*: incorrect

par exemple, le faux-rond admissible des collecteurs ne doit pas dépasser 0,02 à 0,03 mm alors que pour les machines à faible vitesse on peut tolérer, sans compromettre leur bon fonctionnement, des faux-ronds plus importants de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm. Si le faux-rond est largement au-delà de la tolérance admise, il faut soumettre le collecteur au tournage à outil coupant ou à la rectification et, lorsque le faux-rond ou les irrégularités ne dépassent pas 0,5 mm, on peut y remédier par rectification (pour la vérification du faux-rond des collecteurs, se reporter à l'annexe 12).

Avant de procéder au tournage du collecteur il convient de l'échauffer jusqu'à 100 °C, de le serrer à chaud, puis de le laisser refroidir et de le resserrer de nouveau. Ne resserrer que des boulons relâchés. Un serrage exagéré des boulons (des goujons) de fixation du collecteur peut provoquer sa déformation anormale.

Le tournage du collecteur est à effectuer pour une vitesse de coupe de l'ordre de 90 tr/mn et une avance non supérieure à 0,05 ou 0,1 mm par tour. Les collecteurs de grosses machi-

nes sont tournés à l'aide des outils de haute qualité, l'induit restant dans ses paliers; le chariot porte-outil du tour à métaux est ajusté près du collecteur et installé de manière que l'arête coupante de l'outil soit orientée vers le haut et se trouve à un niveau légèrement supérieur à celui du centre. Avant de commencer le tournage du collecteur il est désirable d'assurer le fraisage (voir plus loin) des micas interlames pour que le serrage du cuivre ne rende pas plus difficile la réalisation du fraisage après le tournage.

La rectification du collecteur se fait soit à l'aide de pierres abrasives à grains fins, immobilisées sur le support porte-outil, soit à l'aide d'une meule tournante en corindon à grains fins, de 150 à 300 mm de diamètre, qu'on installe sur un dispositif spécial ou sur le coulisseau porte-meule; avant de procéder à la rectification, il convient de vérifier le bon état de la meule et la mise en place des protecteurs suffisamment solides. En cas de rectification à l'aide d'une pierre abrasive fixe, la valeur optimale de la vitesse circonférentielle du collecteur est comprise entre 10 et 20 m/s, mais on peut opérer également à la vitesse circonférentielle nominale. Lors de la rectification du collecteur à l'aide d'une meule tournante, cette dernière doit tourner à l'envers par rapport au collecteur et l'avance doit être suffisamment faible.

Si la surface du collecteur présente des traces de rayures, des traces de brûlure ou d'autres défauts locaux, il faut procéder au polissage. Après le tournage ou la rectification, le collecteur doit aussi être soumis au polissage. Cette opération permet d'éliminer les traces de traitement du collecteur (à l'outil coupant ou à la pierre abrasive) et de réaliser une surface polie qui favorise le rétablissement d'une mince couche d'oxyde (du « glaçage » ou poli du collecteur) nécessaire au bon fonctionnement du collecteur et des balais. Le polissage est effectué à la vitesse de rotation nominale à l'aide de papier de verre à grains fins n° 00.

Le papier de verre destiné au polissage du collecteur est fixé sur un patin de bois (fig. 7), qui est ajusté avec précision au diamètre du collecteur; la largeur du patin est choisie de manière qu'il puisse se déplacer librement entre les balais de deux consoles voisines. Le patin est appuyé sur le collecteur tournant. Après avoir obtenu une surface lisse et unie, on nettoie le collecteur au chiffon et à l'air comprimé, on fixe sur le patin une nouvelle feuille de papier de verre, on l'enduit d'une mince couche de vaseline propre et on

continue le polissage jusqu'à réaliser une surface présentant un beau poli sombre de teinte uniforme. Tout ce qui a été dit, au sujet des qualités requises du collecteur et de son traitement, est également valable pour les bagues collectrices, à une seule différence près : les conditions de fonctionnement moins dures des bagues collectrices autorisent de

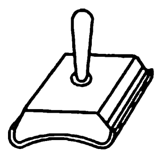


Fig. 7. Patin pour le polissage du collecteur

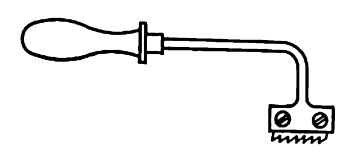


Fig. 8. Scie pour fraiser les micas interlames

tolérer un faux-rond un peu plus grand que dans le cas des collecteurs.

Les micas (micanites) interlames du collecteur sont réduits afin qu'ils soient de 1,5 à 2 mm en retrait des lames ; cette opération s'appelle « fraisage » du collecteur. Le fraisage

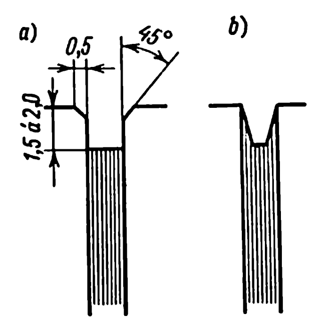


Fig. 9. Fraisage des micas interlames :
a : correct ; *b* : incorrect

Fig. 10. Rainurage hélicoïdal du collecteur

peut être exécuté soit à l'aide d'une fraise spéciale entraînée par un petit moteur électrique, soit à la main, au moyen d'une scie spéciale (fig. 8), confectionnée habituellement avec un petit morceau de lame de scie à métaux (non avoyée) serré dans une poignée. Le fraisage des micas doit être réalisé conformément à la fig. 9, *a* et non comme il est indiqué

sur la fig. 9, *b*; dans ce dernier cas, les micas feront de nouveau saillie sur les lames, même après une légère usure du collecteur. Les bords des lames du collecteur doivent être émoussés à l'aide d'un grattoir sous un angle de 45° environ, sur une largeur de 0,5 mm au maximum.

Parfois et surtout dans les machines à grande vitesse, les mesures prises en vue d'assurer le fonctionnement normal des balais sur les bagues collectrices ne donnent pas de résultats désirés malgré tous les soins apportés à leur réalisation : les balais continuent à cracher fortement et présentent des échauffements locaux excessifs, l'usure des balais et des bagues collectrices est anormale.

Dans de tels cas, un moyen efficace permettant d'améliorer la commutation consiste à pratiquer une rainure hélicoïdale sur le collecteur et surtout sur les bagues collectrices (fig. 10).

Au cours du fonctionnement de la machine, une telle rainure assure un nettoyage continu de la surface de portage du balai des traces de brûlure, et constitue, sous le balai, un canal assurant un refroidissement plus intense de la surface de contact du balai. Il en résulte une brusque amélioration de la commutation et une usure réduite des balais et des bagues. On connaît des cas où l'on n'a réussi à obtenir le fonctionnement normal des balais sur les bagues des rotors à grande vitesse qu'après l'entaillage de rainures hélicoïdales.

Il est recommandé de choisir le pas *t* de la rainure dans les limites de 10 à 25 mm, sa largeur *a* de 3 à 4 mm et sa profondeur *h* suivant la surmesure prévue pour le tournage de la bague. C'est ainsi que pour les bagues en acier de près de 50 mm d'épaisseur montées sur les rotors de turboalternateurs tournant à 3000 tr/mn, la profondeur de la rainure est prise égale à 7,5 mm; le pas à 10 mm et la largeur à 3 mm, alors que pour les bagues en bronze de près de 35 mm d'épaisseur, montées sur les machines tournant à 6000 tr/mn, la profondeur de la rainure est de 3,5 mm, le pas de 10 mm et la largeur de 3 mm.

Après l'entaillage de la rainure il est nécessaire de découper des bourrelets minces (moins de 2 mm) et d'émousser les arêtes vives.

Avant de procéder au tournage, à la rectification et au polissage du collecteur on doit prendre des mesures appropriées pour éviter la pénétration des copeaux et de la pous-

sière abrasive à l'intérieur de la machine; après l'exécution de ces opérations, il faut visiter, nettoyer et souffler la machine à l'air comprimé.

ANNEXE 5

Balais pour machines électriques

Les domaines d'emploi, les conditions de fonctionnement et les caractéristiques des balais recommandés par les Normes soviétiques GOST 2332-63 pour le choix de balais sont rassemblés dans le tableau 1 ci-dessous.

Notes. 1. Quand les machines électriques fonctionnent dans des conditions de vibrations élevées, avec de grandes vitesses angulaires de rotation du collecteur (supérieures à 1500 tr/mn), la pression spécifique sur le balai peut être portée jusqu'à 50 Pa. 2. La densité de courant dans le balai doit être choisie en fonction de la vitesse de rotation du collecteur et des conditions de commutation de chaque type donné de machine électrique. 3. Le coefficient de frottement des balais sur le collecteur est pris égal à 0,25 pour tous les types de balais indépendamment de leur nature. 4. On peut poser approximativement, à 1,97 % près, que 1 kPa (kilopascal) = 10 gf/cm^2.

ANNEXE 6

Aimantation des machines à courant continu

Il arrive parfois que lors de la première mise en marche les génératrices auto-excitatrices ne s'amorcent pas, parce que leur magnétisme rémanent est insuffisant ou complètement absent.

Dans certains cas, les génératrices ne s'amorcent pas après une démagnétisation qui s'est produite au cours du fonctionnement (voir § 8-1).

Les génératrices dont le magnétisme rémanent est inexistant doivent être correctement aimantées depuis une source extérieure. Pour réaliser cette aimantation il convient de procéder comme suit: faire passer un courant dans

Tableau 1

Type de balais	Désignation	Usages	Chute de tension au contact par une paire de balais, V	Densité de courant admissible, A/cm²	Vitesse périphérique, m/s	Pression spécifique, kPa
Balais en charbon graphitique	T2, T6	Génératrices et moteurs à conditions de commutation moyennes	2,0	6	10	20 à 25
Balais graphitiques	Г1 Г3 611М	Génératrices et moteurs à conditions de commutation allégées	2,2 1,9 2	7 10 à 11 10 à 12	12 25 40	
Balais électrographitiques	ЭГ 2а ЭГ 4 ЭГ 8 ЭГ 14 ЭГ 71 ЭГ 74	Génératrices et moteurs à conditions de commutation moyennes et difficiles. Bagues collectrices	2,6 2,0 2,4 2,5 2,2 2,7	10 12 10 10 à 11 10 à 12 10 à 15	45 40 40 40 40 50	20 à 25 15 à 20 20 à 40 20 à 40 20 à 25 17,5 à 25
Balais en graphite-cuivre	М1 М3 М6 М20	Génératrices à basse tension, bagues collectrices	1,5 1,8 1,5 1,4	15 12 15 12	25 20 25 20	15 à 20
	МГ МГ 2		0,2 0,5	20 20	20 20	18 à 23
	МГ 4 МГ 64		1,1 0,5	15 20 à 25	20 25	20 à 25 15 à 20
	МГС 5		2,0	15	35	20 à 25

l'enroulement dérivation, la machine étant à l'arrêt, depuis une source indépendante, par exemple depuis une batterie d'accumulateurs ou une autre source à courant continu disponible. Si l'on utilise un réseau d'éclairage, une autre génératrice en marche ou une batterie d'accumulateurs à tension élevée, il convient d'effectuer le branchement et le débranchement à travers un rhéostat.

Dans le cas des génératrices à excitation série ou composée on arrive parfois à rétablir le magnétisme rémanent disparu par une mise en court-circuit instantanée de la génératrice. Cette mise en court-circuit doit se faire à travers un coupe-circuit ou un disjoncteur à maximum fonctionnant pour 100 à 150 % du courant nominal de la génératrice.

Pour conserver la polarité correcte de la machine, le pôle positif de la source de courant indépendante doit être relié à la borne Ш 1 ou Ш 2 de l'enroulement dérivation ou à la borne C1 ou C2 de l'enroulement série suivant le sens nominal de rotation de l'induit et le schéma adopté pour le couplage des enroulements (voir annexe 1).

Si la génératrice ne s'amorce pas après son aimantation, alors qu'on a la certitude que les extrémités de l'enroulement d'excitation ont été correctement branchées, il convient, pour conserver l'ancienne polarité de la machine, d'aimanter les inducteurs en sens inverse.

Si, après aimantation, la génératrice devra fonctionner en parallèle avec d'autres génératrices, il convient, avant de la coupler sur le réseau, de vérifier sa polarité.

ANNEXE 7

Suppression de crachements aux balais des machines à courant continu

A. Méthodes de suppression de crachements

Les causes de forts crachements au collecteur, indiquées au § 1 sont des causes principales mais non exhaustives. Les étincelles anormales peuvent provenir des causes les plus variées y compris l'état chimique de l'ambiance [21], dans laquelle fonctionne la machine. En outre, les étincelles peuvent se produire subitement ou même varier avec le temps. Dans certains cas, pour rechercher la cause réelle de crache-

ments, il est nécessaire de surveiller pendant longtemps les conditions de fonctionnement du collecteur et des balais. Etant donné que les crachements peuvent être provoqués par des causes très variées, il est impossible d'indiquer tous les indices et symptômes permettant de reconnaître ces causes. Aussi, dans ce qui suit, nous contenterons-nous de donner quelques indications générales.

Tout d'abord, il convient d'apprécier correctement le degré de crachement.

D'après les Normes soviétiques (GOST 183-74), l'intensité des étincelles au collecteur d'une machine électrique doit s'apprécier par le degré de crachement sous l'arête de sortie du balais d'après une échelle spéciale indiquée dans le tableau 1.

Lorsque la machine fonctionne en régime nominal, son degré de crachement ne doit pas être supérieur à $1^1/_2$, sauf une mention spéciale dans les Normes correspondantes ou les cahiers de charge de cette machine.

Comme il en ressort du tableau 1, le critère principal pour apprécier le degré de crachement est constitué par l'état de la surface de travail du collecteur et des balais.

L'observation de la couleur des étincelles peut aussi s'avérer utile. Des étincelles peu nourries qu'on observe souvent sous l'arête de sortie des balais ne présentent aucun danger. Dans ce cas les étincelles sont assez courtes (crachement ponctuel) et de couleur blanc ou de blanc bleuté. Des étincelles allongées de couleur jaune témoignent dans plusieurs cas d'une mauvaise commutation. La couleur verte des étincelles et la présence de cuivre sur la surface de portage des balais sont dues au brûlement du cuivre et témoignent des causes mécaniques de crachement par exemple telles que la saillie des lames du collecteur, l'excentricité du collecteur, la vibration des balais, etc.

Pour rechercher les causes de production d'étincelles aux balais il convient d'examiner attentivement la machine et de remédier à tous les défauts décelés dans le contact glissant balais-collecteur ainsi que dans les circuits électriques et magnétiques de la machine. Après ces opérations préliminaires, on peut procéder à l'examen de la commutation et au réglage des pôles auxiliaires d'après la méthode de la zone sans étincelles (voir plus loin section B du présent annexe 7). Dans le cas où la suppression des défauts et le réglage des pôles auxiliaires ne donnent pas de résultat et la

Tableau 1

Degré de crachement	Caractéristiques du degré de crachement	Etat du collecteur et des balais
1	Absence d'étincelles (commutation sombre)	Absence de toute trace de bleuissement et de brûlure sur le collecteur et les balais
$1^{1}/_{4}$	Faibles étincelles ponctuelles sous une petite partie du balai	
$1^{1}/_{2}$	Faibles étincelles sous la plus grande partie du balai	Apparition de traces de bleuissement sur le collecteur, facilement éliminées par nettoyage du collecteur à l'essence ; traces de brûlure sur les balais
2	Etincelles sous toute l'arête du balai. Peuvent être tolérées seulement pendant des pointes de charge et des surcharges de courtes durées	Apparition de traces de bleuissement sur le collecteur qui ne s'enlèvent pas par nettoyage à l'essence de la surface du collecteur. Traces de brûlure sur les balais
3	Fort crachement sous toute l'arête du balai. Jaillissement de longues étincelles. Ne peut être toléré qu'à des instants de démarrage direct (sans rhéostat) ou d'inversion du sens de marche, à condition que le collecteur et les balais restent à l'état permettant leur exploitation ultérieure	Bleuissement important du collecteur qui ne peut pas être supprimé par nettoyage à l'essence de la surface du collecteur. Traces de brûlure sur les balais, destruction des balais

commutation reste mauvaise, il convient d'utiliser des balais d'une autre nature ou des balais stratifiés et composés (balais doubles).

Le balai est traversé dans le sens collecteur-tresse (appelons ce sens longitudinal) par le courant de charge et, dans le sens transversal, par le courant de commutation. Pour améliorer la commutation il est désirable que la résistance

électrique du balai soit différente dans ces deux sens, à savoir plus grande dans le sens transversal et plus faible dans le sens longitudinal. Cette condition est réalisée avec des balais dits stratifiés ou lamellés qui sont composés de plusieurs plaquettes longitudinales de substance servant à la fabrication de balais, qui sont collées entre elles avec de la colle isolante. Un tel balai chauffe moins et présente une plus faible chute de tension dans le sens longitudinal. Un

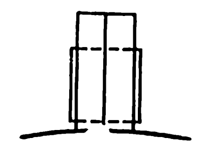


Fig. 1. Balais doubles

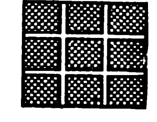


Fig. 2. Rainures sur la surface de travail des balais

balai double est formé de deux balais placés dans la même gaine du porte-balais (fig. 1) de manière à pouvoir se déplacer l'un par rapport à l'autre.

Grâce à la surface de séparation, les balais de ce type offrent une plus grande résistance au courant de commutation

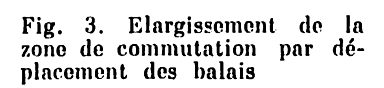
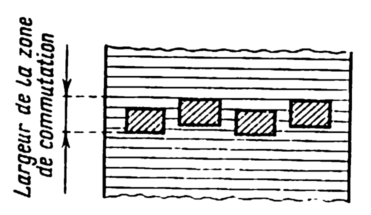


Fig. 3. Elargissement de la zone de commutation par déplacement des balais



se fermant dans le sens transversal, mais la même résistance au courant de charge qu'un balai monobloc. Les balais composés, dont la largeur est plus faible que celle d'un balai fait d'une seule pièce se rodent mieux sur le collecteur et assurent un meilleur contact.

Pour augmenter la résistance des balais dans le sens transversal, on peut pratiquer sur leur surface de travail plusieurs rainures, perpendiculaires entre elles, de 1 mm de largeur et de 3 mm de profondeur, comme il est indiqué sur la fig. 2. Un tel entaillage favorise la ventilation et donc améliore le refroidissement des balais.

Dans certains cas, une amélioration de la commutation peut être obtenue en élargissant la zone de commutation ou en utilisant des balais plus larges. Pour élargir la zone de commutation il convient de déplacer les balais de chaque console de la couronne porte-balais, l'une par rapport à l'autre sur la périphérie du collecteur en les disposant en quinconce (fig. 3). Dans les machines à un seul sens de marche, la commutation peut être parfois améliorée par un décalage de la couronne porte-balais.

B. Réglage des pôles auxiliaires par la méthode de la zone sans étincelles

La méthode de la zone sans étincelles proposée par V. Kassianov consiste à déterminer les valeurs limites (maximales et minimales) du courant dans les pôles auxiliaires, entre lesquelles les balais fonctionnent sans étincelles. Pour faire varier l'intensité du courant dans l'enroulement des pôles auxiliaires et inverser son sens, indépendamment du courant de charge, on débranche l'enroulement des pôles auxiliaires

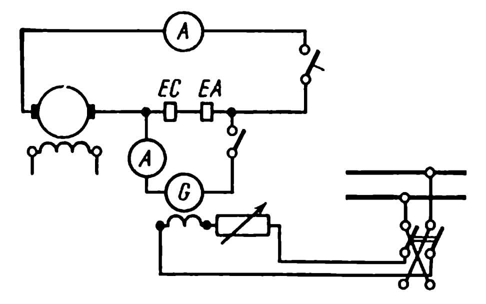


Fig. 4. Schéma pour la détermination de la zone de commutation sans étincelles

et l'enroulement de compensation et on les alimente depuis une source indépendante, ou on leur assure une alimentation d'appoint, également depuis une source indépendante (fig. 4). Dans les cas où les espaces entre les pôles principaux et les pôles auxiliaires sont suffisamment grands, un flux magnétique complémentaire peut être produit (sans alimentation d'appoint) en enroulant, pour la durée des essais, quelques spires au-dessus des bobinages des pôles auxiliaires et en les alimentant en courant approprié. Par un choix convenable du nombre de spires on peut ramener le courant nécessaire à une valeur peu élevée.

Etant donné que pour assurer l'alimentation indépendante des pôles auxiliaires il faut disposer d'une source à tension assez basse mais à forte intensité et que le placement d'un enroulement indépendant sur les pôles auxiliaires peut s'avérer bien souvent impossible, on utilise, surtout dans le cas des grosses machines, la méthode par alimentation d'appoint. Généralement, le courant d'appoint ne dépasse pas 10 à 15 % du courant nominal de la machine. Pour effectuer une expérience d'alimentation d'appoint (fig. 4), on branche une génératrice à basse tension G, à travers un ampèremètre A, entre la borne de l'enroulement de pôles auxiliaires EA et la borne de l'enroulement de compensation EC. La génératrice employée pour l'alimentation d'appoint est une génératrice à excitation indépendante et son circuit d'excitation comporte un inverseur permettant de changer le sens du courant.

Il est recommandé d'effectuer cette expérience d'alimentation d'appoint pour les valeurs nominales de la tension et de la vitesse de rotation de la machine, mais elle peut se faire également en régime de court-circuit à vitesse de rotation nominale. Dans ce dernier cas il convient de prendre des mesures pour éviter l'auto-excitation (voir annexe 10, D-1), en laissant la couronne porte-balais sur la ligne neutre.

Dans la plupart des cas, le réglage de la commutation réalisé en régime de court-circuit donne des résultats tout à fait satisfaisants. Dans les gros moteurs la détermination sur place de la zone de commutation sans étincelles à charge de pointe, entraîne de grandes difficultés qui viennent du fait que, dans ce cas, il s'avère impossible d'assurer une charge régulière réglable ou de faire fonctionner la machine comme génératrice en régime de court-circuit.

On distingue une alimentation d'appoint positive ou additive, quand le flux magnétique produit par le courant d'appoint agit dans le même sens que le flux principal du pôle auxiliaire et une alimentation d'appoint négative ou soustractive, quand le flux produit est en opposition avec le flux principal. La zone de commutation sans étincelles est déterminée en marche à vide pour des courants égaux à $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$, $^4/_4$ et $^5/_4$ du courant nominal. A cet effet, on assure d'abord, la machine tournant en marche à vide à la vitesse nominale, son alimentation d'appoint positive, en augmentant progressivement le courant d'appoint jusqu'à l'apparition de premières étincelles sous les arêtes de

sortie des balais; ensuite on réduit progressivement le courant jusqu'à zéro et, après avoir inversé le sens du courant d'appoint, on assure l'alimentation négative, en augmentant le courant d'appoint également jusqu'à l'apparition de premières étincelles. Pour une détermination plus précise du courant d'appoint, provoquant la production de premières étincelles il convient de reprendre plusieurs fois cette expérience. En marche à vide, les courants d'appoint provoquant les premières étincelles doivent être approximativement égaux pour les deux sens, à condition que les balais soient en bon état de marche. Ensuite, on court-circuite la machine et on reprend l'expérience pour toutes les valeurs du

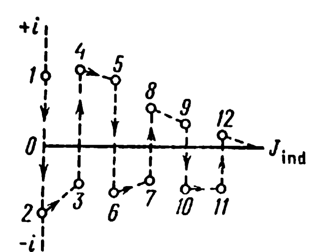


Fig. 5. Etapes successives de l'expérience d'alimentation d'appoint des pôles auxiliaires

courant d'appoint indiquées plus haut. Les étapes successives de l'expérience d'alimentation d'appoint sont représentées par la fig. 5.

On ne devra pas oublier qu'en régime de court-circuit les variations du courant d'appoint pourront fortement influencer le courant dans l'induit; le courant d'induit augmente lors de l'alimentation d'appoint positive et diminue en cas d'alimentation d'appoint négative; ce qui exige d'assurer un réglage correspondant de l'intensité du courant d'induit.

En relevant les courbes de la zone de commutation sans étincelles, il convient d'éviter la production de fortes étincelles aux balais parce que le crachement ne disparaît qu'après une réduction considérable du courant d'appoint, ce qui conduit à une erreur dans la détermination de la largeur de la zone sans étincelles. Pour rendre plus facile l'observation des étincelles il est recommandé d'obscurcir le collecteur.

D'après les résultats de l'expérience d'alimentation d'appoint on construit les courbes déterminant les limites de la zone de commutation sans étincelles. En abscisses on porte le courant d'induit et en ordonnées le courant d'appoint

positif vers le haut et le courant d'appoint négatif vers le bas, à partir de l'axe horizontal. La fig. 6, *a* montre la zone de commutation sans étincelles pour le cas d'une bonne commutation quand les deux courbes sont sensiblement symétriques par rapport à l'axe des abscisses; les courbes de la fig. 6, *b* caractérisent le cas où le champ des pôles auxiliaires est trop faible et celles de la fig. 6, *c* traduisent le cas où ce champ est trop fort. Les courbes de la fig. 6, *d* se rapportent à la zone de commutation dans le cas de saturation des pôles auxiliaires (quand il n'y a pas de proportionnalité entre le courant de charge et le champ magnétique des

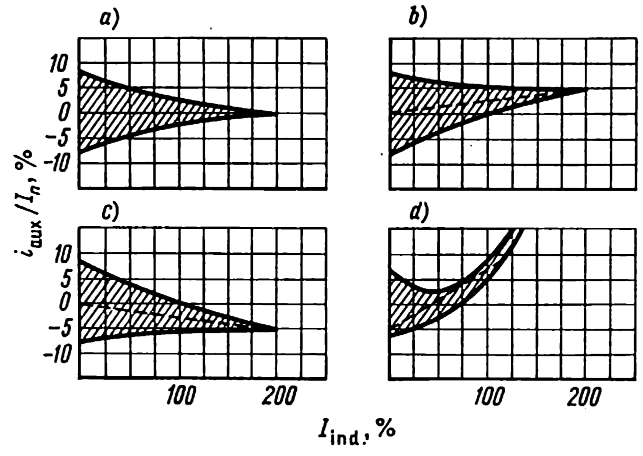


Fig. 6. Zones de commutation sans étincelles

pôles auxiliaires); lorsque la charge augmente, les limites de la zone de commutation sans étincelles se recourbent fortement vers le haut.

L'examen de diverses zones de commutation sans étincelles montre qu'avec l'augmentation du courant les deux courbes limites de cette zone s'approchent l'une de l'autre et qu'elles se coupent pour une certaine valeur de la charge. Au-delà de ce point de rencontre, le fonctionnement sans étincelles de la machine est impossible à réaliser. Le fonctionnement de la machine est d'autant plus stable, en ce qui concerne la commutation, que sa zone sans étincelles est plus large. Une intersection rapide des deux courbes limites de la zone sans étincelles témoigne le plus souvent des défauts mécaniques dans les contacts des balais. La largeur de la

zone de commutation sans étincelles et la position du point d'intersection dépendent aussi de la vitesse de rotation: plus faible est la vitesse de rotation plus large est la zone sans étincelles et plus intense est le courant pour lequel se coupent les limites de cette zone.

En cas d'une bonne commutation, la ligne médiane (représentée en pointillé sur la fig. 6) de la zone sans étincelles se confond presque avec l'axe des abscisses; son écart vers le haut témoigne d'un champ trop faible des pôles auxiliaires dont l'action doit donc être renforcée, alors que son écart vers le bas signifie que les pôles auxiliaires sont trop forts et doivent donc être affaiblis. Le réglage du champ de commutation dû aux pôles auxiliaires peut être obtenu par l'un des trois procédés suivants:

a) par modification du nombre de spires dans l'enroulement des pôles auxiliaires;

b) par shuntage de l'enroulement des pôles auxiliaires lorsque leur champ est trop fort;

c) par variation de la longueur de l'entrefer entre les pôles auxiliaires et l'induit.

Dans les machines devant participer à la pointe de charge l'affaiblissement des pôles auxiliaires par shuntage de leur

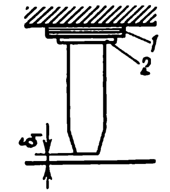


Fig. 7. Cales interposées entre le pôle auxiliaire et la culasse:
1: cales en acier; *2*: cales en matériau amagnétique

enroulement fait naître de grandes difficultés et exige de procéder à des calculs spéciaux, relatifs au choix approprié de la constante de temps électromagnétique du shunt en vue d'assurer la répartition requise des courants entre l'enroulement et le shunt, en cas d'une brusque croissance du courant de charge.

En règle générale, le réglage des pôles auxiliaires est obtenu en modifiant le nombre ou l'épaisseur des cales interposées entre les pôles et la culasse. Pour permettre le réglage du champ magnétique développé par les pôles auxiliaires, les constructeurs interposent souvent entre les pôles et la culasse un nombre suffisant de cales d'acier et de cales amagnétiques (fig. 7). Pour conserver la forme du champ des

pôles auxiliaires lors du réglage de ces derniers il convient de faire varier l'entrefer, de manière que l'épaisseur résultante de la totalité des cales interposées entre un pôle auxiliaire et la culasse, ne soit pas modifiée ; pour y arriver, on remplace au besoin les cales en matériau amagnétique par celles en acier ou inversement.

La valeur approchée de l'entrefer peut être déterminée à partir de l'expérience d'alimentation d'appoint par la formule :

$$\delta'_{éq} = \delta_{éq} \frac{1}{1 \pm \frac{i_{aux}}{I_{ind}} \frac{D}{D-1}},$$

dans laquelle $\delta_{éq}$ et $\delta'_{éq}$ sont les entrefers existant et nécessaire équivalents entre les pôles auxiliaires et l'induit ; i_{aux} est le courant d'appoint déterminé par la ligne médiane de la zone sans étincelles et correspondant au courant nominal dans l'induit ; I_{ind} le courant d'induit nominal ; D le coefficient de compensation de la réaction d'induit.

Pour les machines à enroulement de compensation :

$$\delta_{éq} \cong \delta_1 + \delta_2.$$

Pour les machines sans enroulement de compensation :

$$\delta_{éq} \cong \delta_1 + 2\delta_2,$$

où δ_1 est l'entrefer moyen existant entre l'épanouissement du pôle auxiliaire et l'induit ; δ_2 l'entrefer moyen (l'épaisseur des cales non magnétiques) existant entre le noyau d'un pôle auxiliaire et la culasse ;

$$D = \frac{AW_{aux} + AW_{cc}}{AW_{rl}} = \frac{8ap\,(W_{aux} + W_{cc})}{Na_{aux}},$$

où a est le nombre de paires de dérivations de l'enroulement d'induit ; p le nombre de paires de pôles de la machine ; W_{aux} le nombre de spires sur un seul pôle auxiliaire ; W_{cc} le nombre de spires de l'enroulement de compensation par pôle ; N le nombre total de conducteurs dans l'enroulement d'induit ; a_{aux} le nombre total de dérivations de l'enroulement de pôles auxiliaires et de l'enroulement de compensation.

Pour les machines qui ne comportent pas d'enroulement de compensation le terme W_{cc} est éliminé de la formule.

Si les caractéristiques de bobinages de la machine ne sont pas connues, le coefficient D peut être pris égal à 1,2.

Après avoir réglé l'entrefer à la valeur donnée par la formule indiquée plus haut, il convient de vérifier la commutation de la machine en relevant de nouveau les courbes d'alimentation d'appoint.

Exemple d'application. Le calcul de l'entrefer nécessaire entre les pôles auxiliaires et l'induit est illustré ci-dessous par un exemple de réglage de la commutation qui a été effectuée en plate-forme.

Le but a été d'améliorer par réglage des pôles auxiliaires la commutation d'un moteur de laminoir ayant les caractéristiques suivantes : 1840 kW, 750 V, 2650 A, 80/160 tr/mn. Les courbes d'alimentation d'appoint ont été relevées en régime de court-circuit pour deux vitesses de rotation : 80 tr/mn et 160 tr/mn. L'entrefer entre les pôles auxiliaires et l'induit avant le réglage est $\delta_1 = 19{,}7$ mm ; l'épaisseur des cales non magnétiques en guétinax, $\delta_2 = 10$ mm.

Les courbes d'alimentation d'appoint construites d'après les résultats de l'expérience pour la vitesse principale de 80 tr/mn et la vitesse de 160 tr/mn sont représentées en traits pleins sur la fig. 8.

L'examen des courbes d'alimentation d'appoint à la vitesse de rotation maximale montre que le flux produit par les pôles est insuffisant et qu'il faut donc réduire l'entrefer entre ces pôles et l'induit. Calculons la valeur de cet entrefer pour le courant d'appoint nécessaire de 20 A (à la vitesse de 160 tr/mn). Les caractéristiques des bobinages de la machine sont les suivantes :

$$W_{\text{aux}} = 6\,; \quad W_{\text{cc}} = 6\,; \quad N = 1440\,; \quad a = p = 6\,; \quad a_{\text{aux}} = 2\,;$$

$$D = \frac{8ap\,(W_{\text{aux}} + W_{\text{cc}})}{Na_{\text{aux}}} = \frac{8\cdot 6\cdot 6\,(6+6)}{1440\cdot 2} = 1{,}2\,;$$

$$\delta_{\text{éq}} = \delta_1 + \delta_2 = 19{,}7 + 10{,}0 = 29{,}7 \text{ mm}\,;$$

$$\delta'_{\text{éq}} = \delta_{\text{éq}} \frac{1}{1 + \frac{i_{\text{aux}}}{I_{\text{ind}}}\left(\frac{D}{D-1}\right)} =$$

$$= 29{,}7 \frac{1}{1 + \frac{20}{2650}\left(\frac{1{,}2}{1{,}2-1}\right)} = 28{,}4,$$

ce qui signifie que l'entrefer doit être diminué d'une quantité : $\Delta = 29{,}7 - 28{,}4 = 1{,}3$ mm,

Les courbes d'alimentation d'appoint relevées pour deux vitesses de rotation (voir les courbes en traits inter-

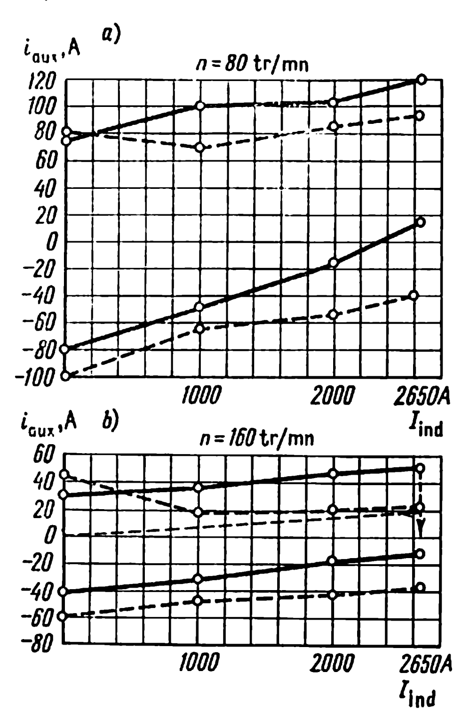


Fig. 8. Courbes d'alimentation d'appoint des pôles auxiliaires d'un moteur électrique de laminoir :
a : à vitesse de base ; *b* : à vitesse maximale

rompus sur la fig. 8) montrent qu'après le réglage, la commutation de la machine est devenue tout à fait satisfaisante.

ANNEXE 8

Recherche des défauts dans les enroulements des machines électriques

A. Défauts dans les enroulements des machines à courant continu

1. Courts-circuits dans l'enroulement d'induit. Les défauts d'isolement peuvent provoquer :

a) un court-circuit entre spires d'une même section; b) un court-circuit de toute la section; c) un court-circuit

entre deux sections placées dans la même encoche; d) des courts-circuits dans les parties frontales de l'enroulement; e) un court-circuit entre n'importe quels deux points de l'enroulement, par exemple en cas de mise à la masse en deux points.

Les fig. 1, *a* et *b* montrent schématiquement un court-circuit entre spires d'une section de l'enroulement imbriqué et de l'enroulement ondulé. Dans les deux cas, le court-circuit

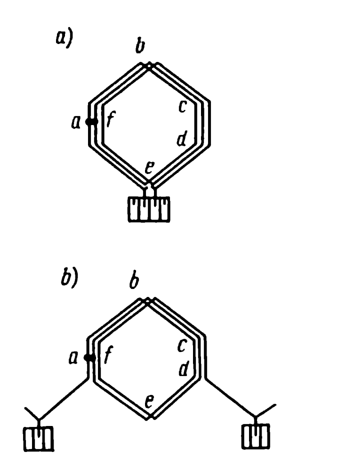


Fig. 1. Court-circuit entre spires de l'enroulement d'induit: *a*: imbriqué; *b*: ondulé

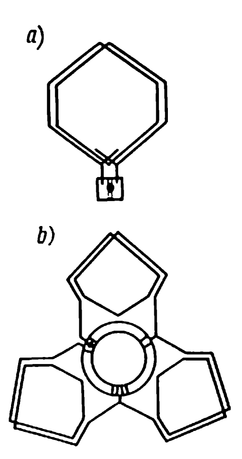


Fig. 2. Court-circuit entre lames du collecteur: *a*: dans l'enroulement imbriqué; *b*: dans l'enroulement ondulé

aux points *a* et *f* produit une branche court-circuitée *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*.

Les fig. 2, *a* et *b* représentent d'une manière schématique un court-circuit entre deux lames consécutives du collecteur dans les enroulements imbriqué et ondulé. En cas d'un enroulement imbriqué, le court-circuit entre les lames consécutives du collecteur entraîne la mise en court-circuit de la section connectée à ces deux lames, alors que le court-circuit entre deux lames consécutives du collecteur dans l'enroulement ondulé provoque la mise en court-circuit des sections comprises dans un « parcours » complet autour de l'induit. Le nombre de ces sections est égal au nombre de paires de pôles de la machine.

Le court-circuit entre deux sections d'un enroulement imbriqué, placées dans la même encoche mais dans deux couches différentes de l'enroulement, entraîne la mise en court-circuit du plus grand nombre de spires. Dans ce dernier cas, on constate le court-circuit entre toutes les spires de l'enroulement se trouvant entre deux balais de polarités différentes. C'est ainsi que le court-circuit entre les barres *9* et *10* (fig. 3) placées dans la même encoche (l'une au-dessus de l'autre) entraîne la formation d'une branche court-circuitée (représentée en gros traits) comprenant les barres *87*, *89*, *1*, *3*, *5*, *7*, *12*, *14*, *16*, *18*, *20* et *22*. La mise en court-circuit est provoquée par les parties des conducteurs *9* et *10* et par les parties frontales correspondantes.

C'est ainsi qu'une dérivation de l'enroulement d'induit se trouve en court-circuit. Si un tel court-circuit se produit dans un enroulement ondulé simple, une moitié de tout l'enroulement d'induit sera toujours mise en court-circuit (fig. 4), et c'est le cas de court-circuit le plus difficile.

Si le court-circuit entre couches des enroulements se produit dans les parties frontales, il entraîne également la formation de circuits court-circuités. Une analyse détaillée de ce type de court-circuit permet de conclure que le nombre de sections mises en court-circuit est d'autant plus grand et la tension à laquelle sont soumises ces sections est d'autant plus élevée que l'endroit de court-circuit se trouve plus près du fer actif de l'induit. C'est ainsi que la probabilité de claquage entre les couches de l'enroulement, à cause d'une mauvaise isolation intercouche, devient plus grande au fur et à mesure qu'on s'approche du fer d'induit.

En cas d'un court-circuit entre un grand nombre de sections, la dérivation court-circuitée peut être localisée d'après l'échauffement local seulement dans les grosses machines multipolaires à enroulement imbriqué. Quant aux enroulements d'induit des petites machines, ils s'échauffent en totalité et bien vite, lorsque la dérivation en court-circuit est importante.

Quand le nombre de sections mises en court-circuit est grand, il est impossible de localiser une branche court-circuitée de l'induit d'après l'échauffement local, étant donné que dans ce cas un enroulement ondulé s'échauffe tout entier.

L'échauffement local ne permet de localiser que des circuits court-circuités de petites dimensions.

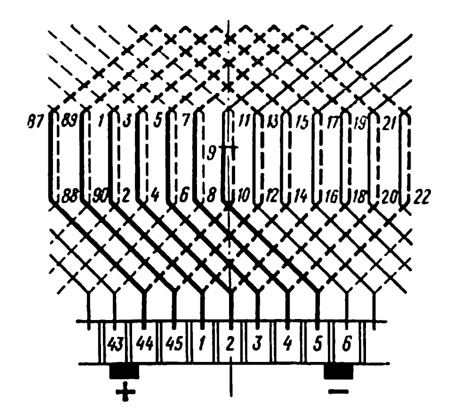


Fig. 3. Court-circuit dans les encoches entre deux sections d'un enroulement imbriqué placées dans des couches différentes

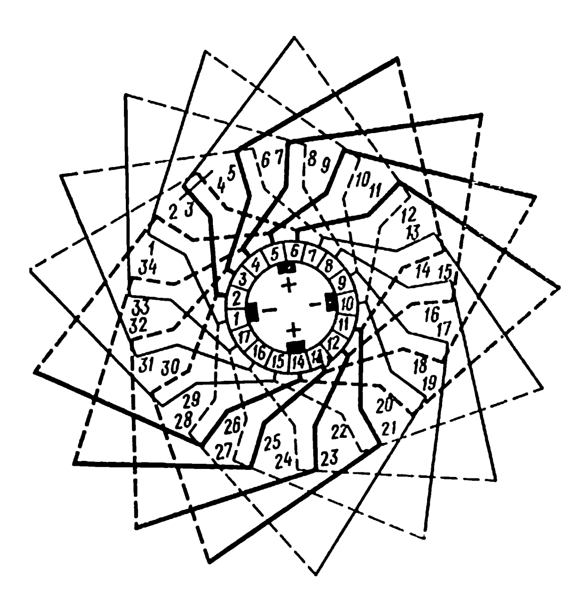


Fig. 4. Court-circuit dans les encoches entre deux sections d'un enroulement ondulé simple placées dans des couches différentes

Il convient de signaler que la localisation d'un circuit court-circuité de grande dimension par d'autres procédés présente aussi de grandes difficultés, surtout dans le cas des enroulements à connexions équipotentielles. D'ailleurs, la nécessité d'une telle localisation est dans plusieurs cas supprimée (l'enroulement présente des défectuosités visibles exigeant de procéder à un rebobinage complet de l'induit). C'est pourquoi, dans les cas les plus simples et les plus fréquents en pratique (par exemple, pour localiser un court-circuit entre spires d'une même section, entre lames consécutives du collecteur ou entre sections voisines logées dans

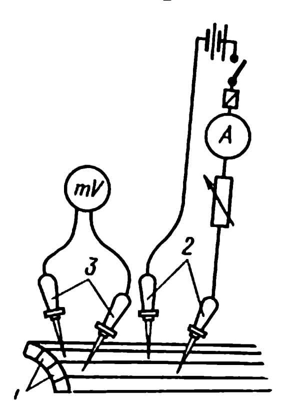


Fig. 5. Schéma pour la localisation des courts-circuits entre spires dans l'enroulement d'induit

la même couche de l'enroulement), on utilise dans la pratique la méthode de la chute de tension qui n'exige pas de mettre en œuvre un équipement spécial. Cette méthode est appliquée aussi bien à l'enroulement imbriqué qu'à l'enroulement ondulé et s'avère particulièrement commode pour l'essai des induits comportant des connexions équipotentielles. Cette méthode peut se résumer comme suit :

On applique, à l'aide d'une paire de tâteurs *2*, une tension continue à deux lames consécutives *1* du collecteur (fig. 5) et on mesure, au moyen d'une deuxième paire de tâteurs *3*, la chute de tension sur la même paire de lames du collecteur.

Dans le cas d'un enroulement imbriqué, un court-circuit dans la section connectée à la paire de lames étudiées entraîne une résistance plus petite, de sorte que la chute de tension sur cette paire sera, pour la même intensité du

courant, plus faible que sur une autre paire de lames entre lesquelles il n'y a pas de court-circuit.

Dans le cas d'un enroulement ondulé simple, une plus faible chute de tension témoigne d'un court-circuit dans les sections de parcours connectées à la paire de lames étudiées. C'est pourquoi, pour localiser une section avariée, on mesure, dans de tels cas, la chute de tension entre les lames du collecteur se trouvant sur le parcours avarié et distantes l'une de l'autre d'un pas au collecteur. Si le pas au collecteur est inconnu, on peut le déterminer d'après la résistance minimale entre deux lames du collecteur se trouvant approximativement à la distance d'un double intervalle polaire.

En appliquant cette méthode, on étudie tout l'induit et on compare les résultats des mesures. Cette étude doit se faire pour des balais relevés. Il convient de signaler que l'étude des induits à connexions équipotentielles peut parfois conduire à des écarts considérables entre les chutes de tension mesurées sur les différentes lames du collecteur même dans le cas où l'enroulement d'induit est en bon état; pourtant, on observe dans ce dernier cas une variation régulière des chutes de tension. Quant à la comparaison des indications, elle se fait d'après les paires de lames correspondantes à la même variation de la chute de tension.

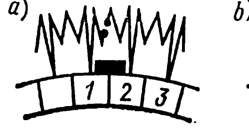
Comme source de courant il est commode d'utiliser une batterie d'accumulateurs mais on peut également employer un réseau à courant continu de 110 ou 220 V. Pour pouvoir limiter l'intensité du courant, on place en série avec l'induit un rhéostat permettant de régler l'intensité du courant. Une intensité de l'ordre de 5 à 10 A s'avère, dans la plupart des cas, suffisante. Pour mesurer les chutes de tension il convient d'utiliser un millivoltmètre de calibre convenable. La chute de tension peut être réglée au besoin en faisant varier, à l'aide du rhéostat, l'intensité du courant d'alimentation.

Pour éviter une détérioration du millivoltmètre il convient d'appliquer sur le collecteur tout d'abord les tâteurs *2* et, après avoir assuré leur contact parfait avec le collecteur, on peut appliquer les tâteurs *3*. Pour enlever les tâteurs il convient de procéder dans l'ordre inverse: d'abord les tâteurs *3* et ensuite les tâteurs *2*. Si les tâteurs *3* sont appliqués sur les lames du collecteur à l'instant où le contact avec les tâteurs *2* est mauvais, ou si l'on commence

à remuer les tâteurs *2* lorsque les tâteurs *3* sont réunis au collecteur, les variations de courant peuvent faire naître une f.é.m. d'auto-induction importante pouvant mettre hors d'usage le millivoltmètre.

Le procédé de localisation de courts-circuits entre spires que nous venons de considérer ne donne de bons résultats que pour un faible nombre de spires dans la section (bobinages en barres). Quant aux sections comportant un grand nombre de spires en fil, la mise en court-circuit de 1 ou 2 spires a pour résultat que les indications du millivoltmètre mesurant les chutes de tension entre les lames d'une section en bon état et d'une section défectueuse sont à peu près les mêmes.

2. Coupures dans l'enroulement d'induit et mauvais contacts aux connexions; contrôle de la bonne qualité des soudures. Une coupure dans l'enroulement ou un mauvais contact compromettent fortement la bonne commutation de la machine et peuvent provoquer, suivant le degré de défaut,



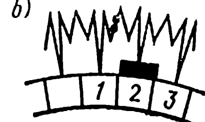


Fig. 6. Coupure d'une section de l'enroulement d'induit

un crachement anormal au collecteur et un grillage des lames du collecteur. En cas de fonctionnement prolongé de l'induit présentant une coupure, l'arc qui se forme à l'endroit de coupure peut provoquer la brûlure de l'isolant et entraîner la mise à la masse et même la brûlure du fer d'induit. En cas de coupure dans un enroulement imbriqué, on constate des étincelles abondantes entre les lames du collecteur auxquelles est connectée la section comportant la coupure.

Lorsque le balai recouvre deux lames du collecteur entre lesquelles est connectée une section comportant la coupure, l'enroulement d'induit est parcouru par un courant normal (fig. 6, *a*). Après le déplacement de l'induit, l'interruption du courant dans le circuit d'induit qui en résulte (fig. 6, *b*) entraîne une forte étincelle jaillissant entre le balai et la lame *1* ce qui provoque le grillage de cette lame et de la lame *2*. Le grillage le plus intense sera constaté près des bords de ces lames orientés l'un vers l'autre. Un tel grillage sera également observé près des bords de la surface de travail

de tous les balais de la machine étant donné que les lames entre lesquelles il y a une coupure, viennent en contact avec tous les balais.

Les indices d'un mauvais contact peuvent être constitués par des phénomènes que nous venons de décrire mais se manifestant à un plus faible degré. Si la coupure provoque de fortes étincelles de couleur verte, caractérisant le grillage du cuivre, un mauvais contact peut ne pas entraîner de crachement excessif alors que les lames du collecteur auxquelles sont connectées les sections à mauvais contact présentent des traces de brûlure.

En cas d'un mauvais contact, tout comme en cas d'une coupure, la présence de connexions équipotentielles peut provoquer le grillage non seulement des lames reliées aux

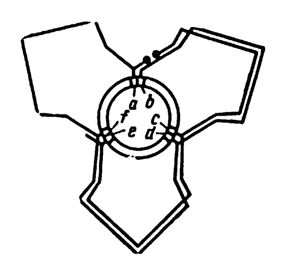


Fig. 7. Coupure dans un enroulement ondulé simple hexapolaire de l'induit

sections défectueuses, mais également des lames se trouvant à double intervalle polaire et reliées aux premières par les connexions équipotentielles.

La coupure dans un enroulement ondulé simple provoque le grillage de plusieurs paires de lames du collecteur se trouvant, l'une de l'autre, à une distance égale au pas au collecteur: le nombre de paires de lames grillées sera égal au nombre de paires de pôles de la machine. C'est ainsi par exemple qu'en cas d'une rupture dans une machine hexapolaire, indiquée sur la fig. 7, seront grillées, en plus des lames *a* et *b* encore les lames *c*, *d* et *e*, *f*.

Pour localiser une coupure dans l'enroulement, on peut avoir recours au même procédé qui sert à la localisation de courts-circuits entre spires dans l'induit (fig. 5). En cas d'une coupure ou d'un mauvais contact, la chute de tension sera plus grande entre les lames auxquelles est connectée la section défectueuse.

Dans le cas où l'on examine un induit à enroulement imbriqué, comportant une coupure, l'appareil de mesure

accusera la plus grande déviation seulement pour une seule paire de lames; dans le cas d'un enroulement ondulé les déviations maximales se produiront pour plusieurs paires de lames se trouvant, deux à deux, à la distance du pas au collecteur.

Pour localiser une rupture dans l'enroulement ondulé, il convient de procéder aux mesures sur la moitié du pas au collecteur et non sur tout le collecteur; cette méthode permettra de déceler une coupure ou un mauvais contact dans les parcours de l'enroulement. Après avoir recherché les parcours comportant une rupture, on peut, en mesurant la chute de tension entre les lames du collecteur des sections comprises dans ces parcours, déterminer les sections comportant une rupture ou un mauvais contact.

Pour ne pas griller l'appareil de mesure, il convient d'alimenter l'induit sous une tension de faible valeur. En cas de mauvais contact entre les sections et le collecteur, la déviation du millivoltmètre branché entre les lames présentant un défaut sera plus élevée parce qu'un mauvais contact présente une grande résistance, ce qui provoque une forte chute de tension.

Dans certains cas, les sections comportant un mauvais contact et l'endroit de mauvais contact dans la section peuvent être localisés en remuant la section au voisinage des soudures, tout en observant les déviations de l'appareil.

La méthode de la chute de tension permet aussi de localiser des coupures et des mauvais contacts dans les connexions équipotentielles. A cet effet, il convient d'effectuer les mesures entre les paires de lames du collecteur distantes d'un pas des connexions équipotentielles (le pas des connexions équipotentielles $Y_{éq} = K/p$, K étant le nombre de lames du collecteur et p, le nombre de paires de pôles). En cas de défauts dans les connexions équipotentielles, leurs indices seront les mêmes que ceux des défectuosités dans l'enroulement lui-même.

La méthode de la chute de tension est aussi largement employée pour le contrôle de la qualité de soudures. Lorsque la soudure est bonne, les indications du millivoltmètre seront à peu près les mêmes entre toutes les lames du collecteur. Les soudures peuvent être considérées comme bonnes, si la différence de résistance entre les différentes lames du collecteur ne dépasse pas 10 % pour les petites machines et 5 % pour les grosses machines essentielles. Une résistance

accrue (ou une chute de tension plus élevée pour la même valeur du courant) entre certaines lames consécutives du collecteur témoigne d'une mauvaise soudure; toutes les soudures relatives à ces lames doivent être refaites avec le plus grand soin.

3. Mise à la masse de l'enroulement d'induit ou du collecteur. Au cours du fonctionnement normal de la machine, la mise à la masse de l'enroulement d'induit ne se manifeste pas s'il n'y a pas de mise à la terre de l'un des fils du réseau. Si une telle mise à la terre s'est produite (et la carcasse de la machine n'est pas isolée de la terre) la mise à la masse de l'enroulement d'induit forme un circuit fermé. Si aucun des fils du réseau n'est mis à la terre, ce circuit

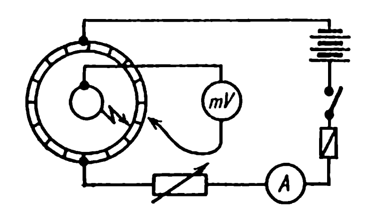


Fig. 8. Schéma pour la localisation d'une mise à la masse de l'enroulement d'induit

fermé ne peut être constitué que dans le cas où l'enroulement est mis à la masse en deux points.

Une mise à la masse de l'enroulement peut être localisée à l'aide d'un mégohmmètre ou d'une lampe électrique de contrôle. Dans le dernier cas, l'un des fils venant de la lampe est branché sur le réseau et l'autre sur le collecteur, l'arbre de l'induit étant branché sur l'autre fil du réseau. La présence d'une mise à la masse de l'enroulement est déterminée par l'illumination de la lampe. Avec ce procédé, l'allumage de la lampe n'est possible qu'en cas de bon contact au point de la mise à la masse.

La mise à la masse de l'enroulement d'induit peut être également localisée, en alimentant l'enroulement d'induit en courant continu depuis une source extérieure (fig. 8). Le choix de tous les éléments du montage est le même qu'en cas de localisation de courts-circuits dans l'enroulement (voir fig. 5).

La source de courant est branchée sur le collecteur comme suit: dans le cas d'un enroulement imbriqué, en deux points diamétralement opposés et, en cas d'un enroulement ondulé, sur les lames se trouvant à la distance de la moitié du pas au

collecteur. Un fil venant du millivoltmètre est relié à l'arbre de l'induit et le deuxième fil est appliqué successivement sur toutes les lames du collecteur. En cas d'essai d'un induit à enroulement imbriqué les indications de l'appareil diminuent au fur et à mesure que la lame reliée à l'appareil s'approche de la lame mise à la masse. Lorsque l'extrémité du fil venant de l'appareil est mise en contact avec la lame du collecteur mise à la masse, l'indication de l'apareil sera, en cas d'un contact métallique, nulle. Son indication sera aussi très faible lorsque le contact n'est pas parfait ou lorsque la mise à la masse s'est produite non dans la lame du collecteur mais dans la section connectée à cette lame.

Quand l'appareil est branché aux lames suivantes, ses indications changent de sens et augmentent au fur et à mesure que la lame reliée à l'appareil s'éloigne de la lame mise à la masse.

Dans le cas d'un enroulement ondulé, les variations des indications du millivoltmètre au fur et à mesure du déplacement de la lame reliée à l'appareil se produisent périodiquement conformément aux déplacements de la moitié du pas au collecteur; les indications plus faibles seront constatées pour des lames du parcours dont les sections (ou les lames elles-mêmes) sont mises à la masse. Les plus faibles indications seront obtenues pour des lames mises à la masse directement ou à travers les sections de l'enroulement.

Etant donné que lors de l'essai de tout l'induit, la tension maximale agissant sur l'appareil de mesure peut s'avérer égale à la tension appliquée à l'induit, on doit en tenir compte lors du choix de l'appareil de mesure. Une diminution des déviations de l'appareil peut être obtenue par un réglage convenable de l'intensité du courant.

Pour localiser une mise à la masse d'un enroulement ondulé il n'est pas nécessaire de soumettre à l'essai le collecteur tout entier. On peut se borner à l'étude des lames se trouvant sur la moitié du pas au collecteur. Après avoir décelé une mise à la masse dans le parcours de l'enroulement, on peut la localiser dans les diverses sections. En divisant les parcours de l'enroulement en sections au moyen de dessoudures, il est nécessaire de vérifier chaque section et les lames du collecteur auxquelles elle est reliée pour s'assurer qu'elles ne sont pas mises à la masse.

Etant donné que l'induit est alimenté par deux branches parallèles, l'essai du collecteur tout entier en cas d'une

seule mise à la masse donne pour un enroulement imbriqué, encore une indication nulle ou minimale, lorsque le millivoltmètre se trouve relié à la lame symétrique de celle « mise à la masse » par rapport aux points d'alimentation de l'induit. Cela tient à ce que ces deux points seront portés à un même potentiel (tout comme les sommets de la diagonale dans un pont de mesure en équilibre).

Un phénomène analogue sera observé également dans le cas d'un enroulement ondulé mais à cette différence près

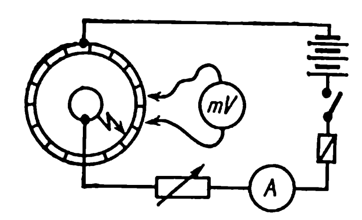


Fig. 9. Schéma modifié pour la localisation d'une mise à la masse de l'enroulement d'induit

qu'on y constatera un groupe de plus faibles déviations pour des lames du parcours symétriques de celui qui comporte une mise à la masse.

Pour ne pas prendre pour une mise à la masse un deuxième point présentant une déviation nulle ou minimale, il convient de changer les points d'alimentation de l'induit. Si, après ce changement, l'un des points à indication nulle ou minimale ne coïncide pas avec le point précédent, ce sera l'indice qu'il y a une seule mise à la masse.

Le procédé de localisation des mises à la masse que nous venons de décrire peut être modifié (fig. 9). L'un des fils venant de la batterie d'accumulateurs est relié à l'une quelconque des lames du collecteur et le deuxième à l'arbre de l'induit. Puis, dans le cas d'un enroulement imbriqué on touche successivement chaque paire de lames consécutives du collecteur avec des fils venant du millivoltmètre. L'indication de l'appareil varie brusquement lorsqu'il se trouve branché sur la paire de lames entre lesquelles il y a une mise à la masse. Cela s'explique par l'inversion du sens de courant dans une partie de la section, comme il est indiqué sur la fig. 10, *a* ; le sens du courant dans la même section, en l'absence de mise à la masse, est montré sur la fig. 10, *b*.

Dans le cas d'un enroulement ondulé, on touche successivement deux lames du collecteur se trouvant exactement à la distance d'un pas au collecteur. Les indices de mise à la masse sont les mêmes (voir fig. 10, *c*).

Les deux procédés donnent de bons résultats lorsqu'il y a un bon contact métallique avec la masse. Quand le contact est mauvais, par exemple en cas d'une très faible résistance d'isolement, ces procédés n'assurent pas des résultats satisfaisants de sorte qu'on doit recourir à la méthode de « brûlure ».

Le collecteur est enroulé de plusieurs spires de fil de fer nu. Une tension normale est appliquée à travers un coupe-circuit et un rhéostat entre le fil et l'arbre de l'induit. Le

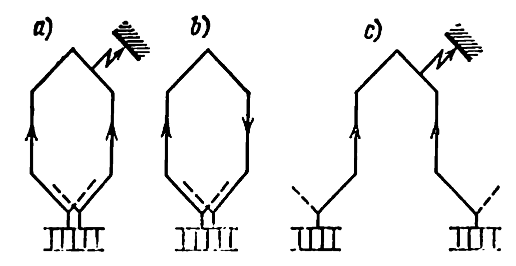


Fig. 10. Explication de la localisation d'une mise à la masse de l'enroulement d'induit

passage du courant électrique à travers un mauvais contact provoque le brûlage de cet endroit et l'apparition d'un arc électrique et de la fumée. C'est d'après ces indices qu'on localise l'endroit de défaut.

Parfois, une mise à la masse peut être localisée si l'on remue, à tour de rôle, les sections se trouvant près des endroits suspects (endroits où l'enroulement sort des encoches), tout en mesurant, au mégohmmètre, la résistance d'isolement. Quand on bouge la section, l'état de contact varie et, donc, sa résistance. Au lieu d'un mégohmmètre, on peut utiliser une lampe témoin, en la branchant entre le collecteur et l'arbre d'induit. Le défaut est décelé d'après le clignotement de la lampe lorsqu'on remue la section.

Dans des cas compliqués, quand les procédés indiqués plus haut ne donnent pas de résultats on est amené à dessouder l'enroulement pour le diviser en parties. Après avoir partagé l'enroulement en deux parties, on vérifie chacune

d'elles séparément, l'aide d'un mégohmmètre. Ayant détecté la mise à la masse dans l'une des parties, on laisse intactes les extrémités de l'autre partie et on divise de nouveau en deux parties la moitié défectueuse. On procède de cette manière jusqu'à l'instant où l'on recherche la section comportant une mise à la masse.

4. Procédés de dépannage de l'enroulement d'induit. L'emploi d'un procédé de dépannage ou d'un autre dépend de la nature des défauts. C'est ainsi par exemple qu'une rupture ou un mauvais contact dans l'enroulement (dans les jonctions au collecteur ou les collerettes) et dans le collecteur peuvent être éliminés par une ressoudure de l'enroulement aux endroits convenables. Si la rupture s'est produite dans le conducteur lui-même, la barre ou la section doit être remplacée. Dans le cas d'une rupture dans les têtes des bobines le défaut peut être éliminé dans certains cas sans changement de la section. Dans les bobinages effectués à la main, l'élimination des coupures à l'intérieur d'une section est difficile à réaliser et on doit procéder à un rebobinage partiel de l'induit.

Les mises à la masse se produisent le plus souvent aux endroits où les sections sortent des encoches. Ce défaut peut être éliminé, en plaçant sous la section de petites cales en matériau isolant (fibre, hêtre sec) ou en interposant des garnitures vernies en leatheroïd, en carton isolant, en mica, etc. Une mise à la masse dans les encoches d'une section peut être liquidée au mieux, en changeant l'isolement de la section ou en remplaçant la section par une neuve. Une mise à la masse due à l'humidification est supprimée par le séchage de la machine. Si plusieurs sections sont mises à la masse et l'isolement des autres sections est peu satisfaisant, on doit procéder au rebobinage de tout l'enroulement d'induit. Pour remédier à une mise à la masse du collecteur, il convient de le démonter et de réparer.

Un court-circuit entre sections non consécutives de l'enroulement d'induit et, en général, un court-circuit entre un grand nombre de sections se présente plus rarement que des courts-circuits à l'intérieur d'une même section ou entre les connexions de sortie des sections aboutissant au collecteur. Aussi, avant de procéder à la suppression des courts-circuits, est-il nécessaire d'examiner minutieusement le collecteur et de s'assurer qu'il n'y a pas de court-circuit entre ses lames.

En cas d'un court-circuit dans la section, cette dernière doit être remplacée ou isolée de nouveau étant donné qu'un tel défaut provoque généralement la mise hors d'état de toute l'isolation de la section. La remise en état de l'isolation locale ne peut suffire que dans le cas d'un défaut d'isolement et à condition que l'isolation soit en bon état. Le fonctionnement de la machine pendant une durée plus ou moins longue, avec des branches en court-circuit, peut provoquer la mise hors d'usage de tout l'enroulement ce qui exigera de procéder à son rebobinage complet.

Ci-dessous nous décrivons quelques procédés permettant de débrancher des sections avariées. Ces procédés ne peuvent être utilisés qu'en qualité d'une mesure temporaire en cas

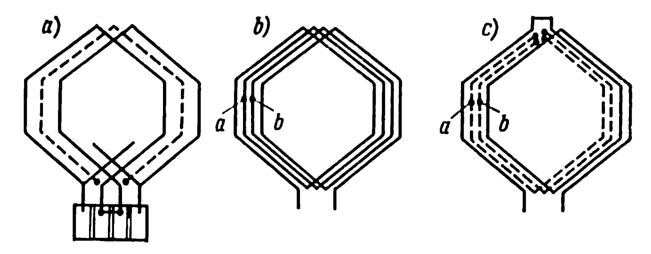


Fig. 11. Débranchement des sections d'un enroulement imbriqué

d'extrême urgence et lorsque le nombre de lames du collecteur est relativement élevé. Dans bien des cas, le débranchement d'une section n'affecte pas de façon sensible la commutation de la machine.

La fig. 11, *a* illustre un procédé de débranchement d'une section de l'enroulement imbriqué comportant une mise à la masse ou une rupture. Les extrémités de la section défectueuse sont dessoudées du collecteur et les deux lames du collecteur auxquelles elles ont été connectées sont reliées entre elles par soudure ou au moyen d'une barrette soudée. Les extrémités de la section débranchée sont isolées avec soin. Si la section comporte un court-circuit entre spires il convient, en plus des opérations qui viennent d'être indiquées, de couper la section pour qu'elle ne puisse pas être traversée par des courants qui sont induits dans la branche court-circuitée lors du fonctionnement de la machine. Dans le cas où la section ne comporte qu'un petit nombre de spires mises en court-circuit, on peut débrancher seulement ces

spires. A cet effet, les spires court-circuitées sont coupées et isolées dans la partie frontale du côté opposé au collecteur, alors que les spires intactes sont soudées l'une sur l'autre. La fig. 11, *b* montre un cas pareil où la section constituée par quatre spires comporte un court-circuit entre deux spires voisines aux points *a* et *b*. La fig. 11, *c* montre, en traits pleins, la branche court-circuitée et en pointillé, la partie de la section débranchée et découpée. En plus de la spire mise en court-circuit, on débranche encore une spire, pour que la partie restante de la section ne comprenne aucune partie de la branche court-circuitée.

De tels débranchements peuvent être également effectués en cas de mise à la masse ou de coupure d'une section de l'enroulement ondulé, mais dans ce dernier cas on

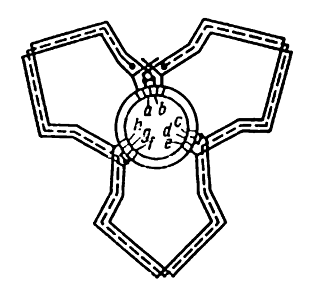


Fig. 12. Débranchement des sections d'un enroulement ondulé

est amené à isoler tout le parcours de l'enroulement. Cela s'explique par le fait qu'un défaut dans une section (voir le circuit en traits interrompus de la fig. 12) met en court-circuit les lames consécutives *a* et *b* de ce parcours. En outre, on dessoude les extrémités aboutissant aux lames *a*, *b*, *d* et *g* et on réunit au moyen de barrettes les lames libres *d* et *g* du collecteur avec les lames consécutives *c* et *f*. Une telle connexion des lames libres avec les lames consécutives permet d'améliorer la commutation. Le circuit court-circuité doit être découpé et les extrémités doivent être isolées.

Le débranchement d'un parcours entier n'est pas obligatoire, il suffit de mettre hors circuit seulement la section défectueuse. C'est ainsi par exemple que lorsque le défaut se présente dans la section branchée sur les lames du collecteur *b* et *d* (fig. 12), on dessoude les extrémités de cette section des lames et on réunit les lames *b* et *d* entre elles par un conducteur solidement fixé. Dans un enroulement ondulé on peut débrancher également une partie de spires de

la section en procédant de la même manière que dans l'enroulement imbriqué.

5. **Défauts dans l'enroulement inducteur.** Dans les enroulements inducteurs, les défauts se rencontrent le plus souvent aux endroits de passage, dans les connexions de sortie des bobines et aux endroits de passage des connexions à travers la carcasse. Parmi les défauts les plus fréquents, il convient de citer: la mise à la masse des enroulements, la coupure ou le mauvais contact dans les enroulements, le court-circuit entre spires.

Pour détecter une bobine mise à la masse, on débranche de l'induit tout l'enroulement et on l'alimente en courant continu, à la tension normale dans le cas de l'enroulement

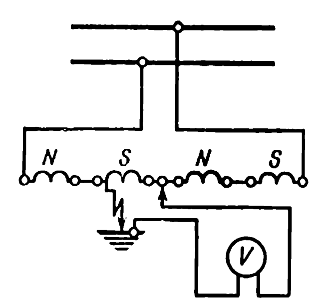


Fig. 13. Schéma pour la localisation d'une mise à la masse de l'enroulement inducteur

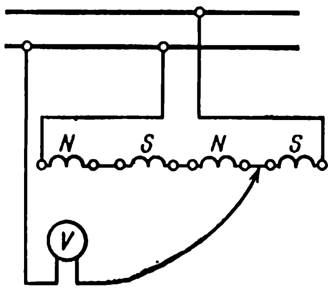


Fig. 14. Schéma pour la localisation d'une coupure dans l'enroulement inducteur

dérivation. Ensuite, on branche sur la masse un fil venant du voltmètre et on touche avec le deuxième (qui est libre) les barrettes de connexion entre les pôles (fig. 13). L'indication minimale de l'appareil sera obtenue des deux côtés de la bobine mise à la masse. En essayant un enroulement série ou un enroulement de pôles auxiliaires il convient de se servir d'un millivoltmètre, en prévoyant dans le circuit un rhéostat pour réduire l'intensité du courant.

Les bobines mises à la masse peuvent être également localisées en les débranchant et en les vérifiant à la lampe témoin ou au mégohmmètre.

Une coupure dans les enroulements inducteurs ne se présente que dans les bobines faites en fil de petite section, c'est-à-dire dans les bobines de l'enroulement dérivation. Quant aux bobines de l'enroulement série et de l'enroule-

ment des pôles auxiliaires, ce défaut ne s'y présente presque jamais. Un mauvais contact peut s'observer dans les enroulements de tous les types. Une coupure ou un mauvais contact sont observés le plus souvent dans les connexions de sortie des bobines, dans les barrettes de connexion entre les pôles et dans les cosses de câble.

Pour localiser une coupure ou un mauvais contact dans la bobine de l'enroulement dérivation, on lui applique la tension normale et on touche avec les fils venant du voltmètre les connexions de sortie de chaque bobine. En cas de rupture, le voltmètre branché aux bornes de la bobine défectueuse indiquera la tension totale du réseau. Sur les autres bobines, l'appareil n'indiquera aucune tension.

En cas de mauvais contact, la tension entre les bornes de la bobine défectueuse sera supérieure à celle mesurée entre les bornes des autres bobines.

Le procédé que nous venons de décrire peut être légèrement modifié. L'enroulement est aussi mis sous la tension normale et l'un des fils venant du voltmètre est relié à l'un des fils du réseau alors que le deuxième fil du voltmètre est appliqué successivement sur toutes les connexions de sortie des bobines (fig. 14); l'aiguille de l'appareil restera immobile jusqu'à l'instant où sera recouverte la bobine comportant une coupure. Celle-ci peut être également localisée par une alimentation successive de toutes les bobines. En l'absence de coupure, la bobine sera parcourue par un courant, ce qui est constaté à l'aide d'un ampèremètre placé sur le circuit.

Enfin, une coupure peut être également localisée à l'aide d'un mégohmmètre ou d'une lampe témoin, sans désaccoupler les bobines, en vérifiant la connexion entre deux extrémités de chaque bobine après avoir débranché les extrémités de l'enroulement.

Le court-circuit entre un petit nombre de spires de l'enroulement d'excitation dérivation peut avoir peu de répercussions sur le fonctionnement de la machine surtout dans le cas d'un enroulement ondulé ou d'un enroulement imbriqué à connexions équipotentielles.

Lorsque l'enroulement dérivation comporte un court-circuit, on observe un échauffement inégal des bobines et la bobine défectueuse est la moins chauffée. Cela s'explique par le fait qu'en cas de débranchement d'une partie de spires, pour le même courant dans toutes les bobines (qu'on

suppose être branchées en série), la quantité de chaleur dégagée dans la bobine défectueuse est plus faible que dans les autres bobines et les spires en court-circuit se trouvant dans le champ magnétique continu ne sont le siège d'aucune f.é.m. induite qui pourrait être développée dans un champ magnétique variable. Un échauffement plus fort des bobines saines tient à ce que le courant dans l'enroulement d'excitation augmente parce que sa résistance diminue. La bobine défectueuse peut être également localisée par la mesure de la résistance au moyen d'un pont de mesure ou par la mesure de la chute de tension sur la machine en marche.

Ces deux procédés ne donnent de bons résultats que lorsque le nombre des spires en court-circuit est relativement élevé étant donné que la résistance des bobines en bon état peut différer de quelques pour cent.

Des résultats certains peuvent être obtenus en localisant un court-circuit entre spires par l'alimentation de l'enroulement dérivation en courant alternatif. Avec ce procédé, les spires en court-circuit, même au petit nombre, se manifestent immédiatement parce que l'impédance et, par conséquent, la tension aux bornes de la bobine défectueuse varient brusquement (voir aussi annexe 8, B-5).

L'impédance que la bobine offre au courant alternatif étant notablement supérieure à sa résistance en courant continu, on applique à l'enroulement d'excitation une tension alternative plus élevée ou on alimente, l'une après l'autre, une partie de bobines. Lorsqu'une bobine défectueuse est alimentée en courant alternatif, on observe non seulement une diminution de la chute de tension entre ses bornes mais aussi un échauffement élevé des spires en court-circuit qui embrassent le flux magnétique variable.

Pour tous les essais des bobines en courant alternatif, la tension à appliquer doit être réglée de manière que l'intensité du courant alternatif dans les bobines en essai ne soit pas supérieure à la valeur nominale du courant continu. A cet effet, on place au besoin un rhéostat en série avec la bobine en essai. En outre, pour éviter une détérioration de l'enroulement par un courant excessif, il convient aussi de prévoir un coupe-circuit.

Au cours des essais en courant alternatif, on ne devra pas perdre de vue qu'une haute tension peut agir sur l'induit et les inducteurs non branchés, de sorte qu'on doit prendre des précautions appropriées.

Les essais en courant alternatif ne donnent des résultats sûrs que dans le cas où les bobines ne comportent pas de carcasses métalliques qui exercent un effet démagnétisant pareil à celui d'un enroulement secondaire mis en court-circuit d'un transformateur. En outre, les balais doivent être isolés du collecteur sinon un effet démagnétisant peut être produit par les sections de l'enroulement d'induit mises en court-circuit par les balais.

Un court-cicrcuit entre spires de l'enroulement série ou de l'enroulement des pôles auxiliaires peut être localisé si l'on alimente ces enroulements en courant continu soit à travers un rhéostat, soit lors du fonctionnement normal de la machine. Les tensions sont à mesurer au millivoltmètre. Il est difficile de localiser un défaut d'après un échauffement inégal de ces bobines. Un court-circuit dans l'enroulement des pôles auxiliaires se caractérise par l'absence de crachement en marche à vide et par des étincelles aux balais de l'une des consoles qui augmentent avec la charge.

Les procédés à appliquer pour le dépannage des enroulements inducteurs dépendent entièrement de la nature des défauts. Une coupure, ou un mauvais contact qui se produit à l'extérieur à des endroits accessibles pour la réparation est éliminée par réfection des soudures. Pour localiser une mise à la masse, la bobine défectueuse est déposée du noyau et est examinée aux endroits de son contact avec la pièce polaire et avec la culasse.

Des courts-circuits dans les enroulements inducteurs sont éliminés, lorsqu'ils se produisent à des endroits autres que les connexions de sortie, par un bobinage partiel ou complet. On enlève à la bobine quelques spires et on l'examine. Si l'on constate que l'isolation des bobines est en bon état, sauf aux endroits de mise à la masse ou de court-circuit entre spires, on peut se borner à l'isolation des endroits défectueux. Dans le cas contraire, il est nécessaire de procéder à un rebobinage complet de la bobine.

Dans le cas où les défauts dans les enroulements inducteurs sont dus à l'humidité de l'isolation, le remède consiste à sécher les bobines.

B. Défauts dans les enroulements des machines à courant alternatif

1. Courts-circuits dans les enroulements à courant alternatif (les enroulements statoriques et les enroulements rotoriques des moteurs asynchrones). Les défauts d'isolement des bobines peuvent provoquer les courts-circuits suivants: entre spires d'une même bobine, entre bobines ou groupes de bobines d'une même phase, entre bobines des phases différentes.

L'indice principal permettant de localiser un court-circuit dans les enroulements à courant alternatif est un échauffement anormal du circuit court-circuité. A cet effet, il convient de débrancher et de palper l'enroulement. L'enroulement ne doit être palpé qu'après sa mise hors tension. Pour rechercher un défaut dans le rotor bobiné (à bagues) d'un moteur asynchrone, il convient de caler le rotor et de brancher le stator sur le réseau d'alimentation. Dans le cas d'une mise en court-circuit d'une partie considérable de l'enroulement rotorique, ou dans le cas des moteurs de grande puissance, le freinage à tension nominale devient impossible à réaliser parce qu'il fait naître dans le stator une intensité de courant élevée et amène donc le fonctionnement des dispositifs de protection du moteur. Dans de tels cas, il convient de procéder aux essais sous une tension réduite.

Dans certains cas une partie en court-circuit de l'enroulement peut être localisée par examen superficiel, d'après les isolants carbonisés.

Il faut ne pas perdre de vue que lorsque l'enroulement comporte plusieurs dérivations un court-circuit dans l'une des dérivations de la phase (en cas d'un grand nombre de spires court-circuitées) peut provoquer l'échauffement de l'autre dérivation qui ne présente pas de court-circuit parce que celle-ci se trouve court-circuitée par les spires de la dérivation avariée de l'enroulement (pour la localisation des défauts dans des cas pareils, voir plus loin).

La phase comportant un court-circuit peut être détectée d'après l'asymétrie du courant consommé au réseau. Lorsque l'enroulement est couplé en étoile (fig. 15, *a*) le courant (A_3) dans la phase comportant un court-circuit sera plus élevé que dans les deux autres phases. En cas de couplage en triangle (fig. 15, *b*), les courants (A_1 et A_3) dans les

deux phases du réseau, entre lesquelles est branchée la phase défectueuse seront les plus élevés que le courant dans la troisième phase (A_2). Il est recommandé d'effectuer l'expérience de localisation d'une phase défectueuse sous une tension réduite (1/3 à 1/4 de la valeur nominale) dans le cas d'un moteur asynchrone à rotor bobiné, l'enroulement de ce dernier peut être ouvert, alors que dans le cas d'un moteur asynchrone à cage ou dans le cas d'un moteur synchrone le rotor peut tourner ou être calé. En réalisant cette expérience sur un moteur synchrone à rotor calé, on doit court-circuiter son enroulement d'excitation ou le fermer à travers une résistance de décharge.

Lors de l'expérience sur une machine synchrone à l'arrêt, les courants dans ses phases seront différents, même dans

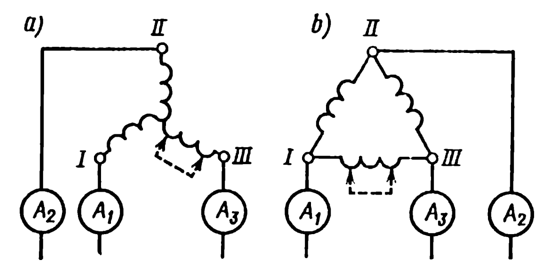


Fig. 15. Explication des indices de court-circuit dans les enroulements triphasés:
a: couplés en étoile; *b*: couplés en triangle

le cas où la machine est en bon état de marche ce qui s'explique par une asymétrie magnétique de son rotor. La rotation du rotor fera varier ces courants, pourtant si l'enroulement de la machine est en bon état, les limites de leurs variations seront les mêmes.

Une phase en court-circuit peut être également localisée d'après la valeur de sa résistance en courant continu, mesurée soit avec un pont soit d'après la méthode d'un ampèremètre et d'un voltmètre: la phase comportant un court-circuit aura une résistance plus faible que les autres phases. S'il est impossible de débrancher les phases on mesure les trois résistances entre phases. Lorsque les phases sont couplées en étoile (fig. 15, *a*) la plus grande valeur de la résistance sera obtenue lors de la mesure entre les extrémités des phases ne comportant pas de court-circuit; les deux autres

résistances seront égales entre elles et inférieures à la première. En cas de couplage en triangle (fig. 15, *b*), la résistance la plus faible sera obtenue lors de la mesure entre les extrémités de la phase comportant un court-circuit ; les deux autres mesures donneront deux résistances égales entre elles et supérieures à la première.

Les groupes de bobines ou les bobines distinctes comportant des courts-circuits peuvent être détectés si on alimente en courant alternatif soit tout l'enroulement, soit seulement la phase défectueuse. Dans ce cas, on juge d'après l'échauffement ou d'après la valeur de la chute de tension mesurée entre leurs extrémités. Les groupes de bobines ou les bobines distinctes comportant un court-circuit seront fortement échauffés et donneront une chute de tension plus faible (pour la mesure de la tension il est commode d'utiliser des palpeurs pointus qui percent l'isolation des conducteurs de connexion). Dans ce cas, de même que dans le cas examiné plus haut, les bobines défectueuses peuvent être localisées d'après la valeur de la résistance en courant continu.

Les courts-circuits dans l'enroulement d'un alternateur peuvent être localisés, en mesurant la valeur de la f.é.m. induite dans les phases de l'enroulement, dans les groupes de bobines ou dans les bobines distinctes. A cet effet, on met en marche l'alternateur, on assure une faible excitation et on mesure les tensions simples si les enroulements sont couplés en triangle, il convient, au préalable, de les débrancher l'une de l'autre. La phase comportant un court-circuit aura une tension plus faible que les autres. Pour localiser un groupe de bobines ou une bobine distincte présentant un court-circuit, il convient de mesurer la tension à leurs extrémités. Sur une machine à tension élevée, cet essai peut être effectué en utilisant la tension résiduelle.

Dans les cas où il est nécessaire de déterminer si le défaut s'est produit dans l'enroulement statorique ou dans l'enroulement rotorique, on procède comme suit:

On applique à l'enroulement statorique une tension réduite (1/3 à 1/4 de la valeur nominale), le circuit rotorique étant coupé, et on mesure la tension sur les bagues du rotor, en faisant tourner lentement le rotor. Si les tensions entre les bagues du rotor (prises deux à deux) ne sont pas égales entre elles et varient suivant la position du rotor par rapport au stator, c'est l'indice qu'un court-circuit s'est produit

dans l'enroulement statorique. Si le court-circuit est dans l'enroulement rotorique (l'enroulement statorique étant en bon état), la tension mesurée entre les bagues du rotor sera différente mais elle ne variera pas avec la position du rotor. Cet essai peut être également effectué en alimentant le rotor et en mesurant les tensions aux bornes du stator, mais la situation, dans ce cas, est inversée. La tension appliquée au rotor doit être comprise entre 1/3 et 1/4 de la tension nominale entre les bagues du rotor, c'est-à-dire de la tension entre les bagues lorsque le rotor est immobile et le stator est mis sous la tension nominale.

Après avoir établi l'enroulement (rotorique ou statorique) présentant un court-circuit entre spires, on détermine la

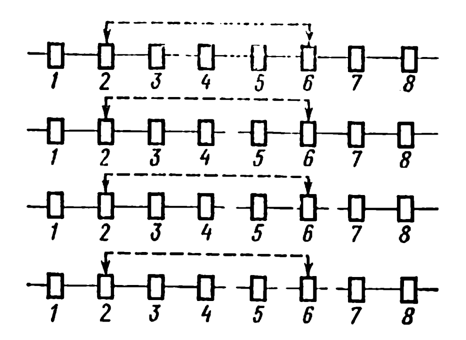


Fig. 16. Localisation d'un court-circuit entre bobines d'une même phase

phase, le groupe de bobines ou la bobine en mauvais état, en employant l'un des procédés décrits plus haut.

Dans des cas compliqués (mise en court-circuit d'un grand nombre de bobines) ainsi que dans le cas où la dérivation en court-circuit de l'enroulement ne peut pas être localisée pour une cause quelconque, on a recours à la méthode de division de l'enroulement en plusieurs parties. A cet effet, tout d'abord on divise l'enroulement en deux parties égales et on vérifie au mégohmmètre si ces parties sont en court-circuit. Ensuite, on divise l'une de ces parties de nouveau en deux parties égales et on vérifie le court-circuit entre ces parties et la première partie et ainsi de suite jusqu'à ce que l'on recherche les bobines comportant un court-circuit.

Pour illustrer cette méthode, la fig. 16 représente schématiquement la localisation d'un défaut dans une phase possédant huit groupes de bobines et comportant un court-

circuit entre les bobines 2 et 6. La division de l'enroulement en parties est représentée par étapes successives.

Le procédé de division successive en parties égales permet de se limiter à un nombre de dessoudures plus petit qu'en cas de division de tout l'enroulement en groupes de bobines.

Dans le cas où le court-circuit s'est produit entre deux phases, l'endroit de défaut est localisé en procédant de la même manière que précédemment, en déconnectant les enroulements phase par phase. On divise les bobines de l'une des phases comportant un court-circuit en deux parties et on vérifie au mégohmmètre s'il y a court-circuit entre chacune de ces parties et la deuxieme phase. Ensuite, la partie qui est en court-circuit avec une autre phase, est divisée de nouveau en deux parties dont chacune est vérifiée, etc.

La méthode de division successive en parties est aussi appliquée pour localisation de courts-circuits dans les enroulements à plusieurs dérivations. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de diviser les phases défectueuses en dérivations, de déterminer les dérivations entre lesquelles il y a un court-circuit et d'appliquer ensuite cette méthode à ces dérivations.

Etant donné que les courts-circuits entre phases ou entre groupes de bobines se produisent le plus souvent dans les têtes des bobines ou les conducteurs de connexion, on arrive parfois à localiser tout de suite l'endroit de court-circuit, en soulevant et en remuant les têtes des bobines, tout en effectuant une vérification au mégohmmètre.

2. Ruptures et mauvais contacts dans les enroulements à courant continu. Avant de procéder à la localisation de ruptures ou de mauvais contact dans l'enroulement, il convient de s'assurer que ces défauts sont absents dans le circuit extérieur à l'enroulement. C'est ainsi par exemple que les indices d'une coupure ou d'un mauvais contact dans les enroulements statoriques peuvent être consécutifs à la fusion d'un fusible, à une mauvaise portée des contacts dans les appareils de démarrage, à un mauvais contact aux conducteurs de sortie, etc. Les mêmes défauts peuvent également se présenter dans la couronne de court-circuit d'un moteur asynchrone, à cause d'un mauvais contact de l'un des balais, etc. Après avoir établi que le défaut s'est produit dans l'enroulement lui-même, il faut procéder à un examen

minutieux de toutes les soudures et surtout de celles dans les collerettes des rotors.

La phase présentant une coupure peut être détectée au moyen d'un mégohmmètre. A cet effet, il convient de procéder comme suit : lorsque l'enroulement est couplé en étoile, brancher au point neutre l'un des fils venant du mégohmmètre et toucher avec le deuxième fil les extrémités de toutes les phases, l'une après l'autre ; si l'enroulement est couplé en triangle, déconnecter l'enroulement en un point et vérifier chaque phase séparément.

Dans le cas où le point neutre de l'enroulement couplé en étoile est inaccessible la phase présentant une rupture peut être décelée à l'aide des ampèremètres ou au moyen d'un

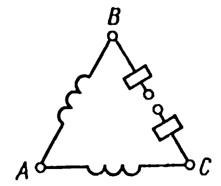


Fig. 17. Localisation d'une coupure dans un enroulement couplé en triangle

mégohmmètre. A cet effet, les deux fils venant du mégohmmètre sont appliqués deux à deux successivement sur toutes les extrémités de l'enroulement. Si les phases sont couplées en triangle il s'avère impossible de rechercher au mégohmmètre la phase présentant une rupture sans procéder à la déconnexion de l'enroulement. Dans ce cas, la phase défectueuse peut être localisée, en mesurant la résistance ohmique de l'enroulement entre ses bornes. Les mesures faites entre les points A et B (fig. 17), ainsi qu'entre les points A et C nous donnent les mêmes valeurs des résistances, alors que la résistance mesurée entre les points B et C (les extrémités de la phase présentant une coupure) sera égale à la somme des résistances de deux autres phases.

Dans le cas d'un alternateur dont les enroulements de phase sont connectés en étoile, la rupture dans une phase quelconque peut être localisée par l'absence de tension dans cette phase. Si les enroulements sont couplés en triangle, la rupture de l'une des phases se localise par le fait que les tensions entre phases dans une phase sont les mêmes en marche à vide de sorte que pour détecter la phase en mauvais état, il est nécessaire soit de déconnecter les enroulements et de mesurer la tension aux bornes de chaque phase, soit de

localiser la phase défectueuse en mesurant les résistances ohmiques (voir fig. 17).

Pour localiser un groupe de bobines ou une bobine présentant une rupture, on applique l'un des fils venant du mégohmmètre sur l'une des extrémités de la phase et l'autre fil du mégohmmètre successivement sur tous les conducteurs de connexion entre les groupes de bobines et les bobines: en parcourant les parties de l'enroulement comportant une rupture, le mégohmmètre accuse des indications plus grandes (suivant la résistance d'isolement de l'enroulement en essai). Pour cet essai, il est commode d'utiliser des sondes pointues pour éviter de décaper les fils de connexion. Le nombre de décapages ou de percements de l'isolation peut être réduit. Dans ce but, il convient d'appliquer l'un des fils du mégohmmètre tout d'abord sur le milieu de l'enroulement de phase et le deuxième fil successivement sur les extrémités de la phase et de déterminer ainsi la moitié présentant une coupure, après cela on doit appliquer le fil du mégohmmètre au point milieu de la moitié défectueuse et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ait recherché la bobine comportant une rupture.

Les endroits les plus probables où se produisent des ruptures dans les enroulements en fil sont les connexions entre les bobines et, dans les enroulements en barres, les soudures (des collerettes). Dans les cages court-circuitées des rotors des moteurs asynchrones et dans les enroulements de démarrage des moteurs synchrones, les ruptures et les mauvais contacts proviennent assez souvent de la mauvaise qualité de soudure ou de brasure, aux endroits de connexion des tiges avec les couronnes de court-circuit. Les ruptures et les mauvais contacts dans les enroulements de démarrage sont souvent provoqués par l'oxydation des surfaces de contact des couronnes de court-circuit dont les parties sont réunies entre elles au moyen de boulons.

Les ruptures dans les enroulements à cage en court-circuit peuvent se produire également dans les encoches par suite des dégradations mécaniques. Dans les rotors des moteurs asynchrones utilisant des enroulements coulés en aluminium d'une seule pièce, les ruptures dans les encoches peuvent avoir pour cause une mauvaise qualité de coulage.

Pour vérifier si une rupture ou un mauvais contact s'est produit dans un enroulement à cage en court-circuit, on procède à l'essai suivant.

On cale le rotor et on applique au stator une tension égale à 1/4 ou 1/5 de sa valeur nominale. Ensuite, on fait tourner lentement le rotor et on mesure l'intensité du courant dans le stator (dans une seule ou dans toutes les trois phases). Si le rotor est en bon état, l'intensité du courant statorique sera la même pour toutes les positions du rotor alors qu'en cas d'une coupure ou d'un mauvais contact, elle variera en fonction de la position du rotor.

Les endroits de rupture et de mauvais contact dans les parties extérieures des enroulements à cage en court-circuit des moteurs asynchrones et dans les enroulements de démarrage des machines synchrones peuvent être localisés par une visite externe minutieuse.

Une rupture de la tige dans l'encoche peut être localisée en procédant comme suit:

On sort légèrement le rotor du stator et on le bloque avec sûreté pour empêcher sa rotation: on applique à l'enroulement du stator une tension réduite (1/4 à 1/5 de la

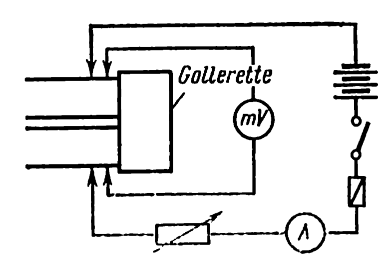


Fig. 18. Schéma pour la localisation d'un mauvais contact dans les collerettes de l'enroulement rotorique d'un moteur asynchrone

valeur nominale). Sur chaque encoche de la partie, du rotor retirée du stator on applique successivement une mince plaquette d'acier recouvrant deux dents du rotor. Lorsque la plaquette se trouvera au-dessus des encoches qui ne contiennent pas de tiges rompues, elle sera attirée et vibrera: dès que la plaquette recouvrera l'encoche dans laquelle est logée une tige défectueuse son attraction et sa vibration seront sensiblement plus faibles ou même complètement inexistantes.

Pour protéger l'enroulement contre un échauffement excessif, il convient d'effectuer cet essai d'une manière assez rapide. Un mauvais contact dans l'enroulement peut être localisé en appliquant la méthode de la chute de tension, l'alimentation de l'enroulement étant assurée en courant

continu. Le schéma du montage permettant de localiser un mauvais contact aux collerettes du rotor d'un moteur asynchrone est représenté par la fig. 18; il est analogue au schéma donné plus haut (voir fig. 5). Dans la collerette défectueuse, la chute de tension sera plus grande que dans les collerettes saines dont les soudures sont en bon état.

3. **Mise à la masse des enroulements à courant alternatif.** Une phase de l'enroulement mise à la masse peut être localisée à l'aide d'un mégohmmètre après avoir déconnecté (si les enroulements statoriques ont six bornes) ou dessoudé les phases.

Une localisation précise de l'endroit de défaut à la masse est facilitée par la « brûlure ». Dans le cas des machines à basse tension, cette opération consiste en ce que l'une des extrémités de la phase est branchée à un pôle du réseau dont le deuxième pôle est mis à la masse à travers un coupe-circuit de 30 à 40 A. Le passage du courant à travers l'endroit de mise à la masse produit un dégagement de fumée. Il convient d'élever progressivement la tension appliquée jusqu'à provoquer un claquage complet. Dans le cas d'une machine à tension élevée, la brûlure peut être obtenue soit en appliquant une basse tension soit en utilisant une installation d'essai spéciale.

L'endroit de mise à la masse de l'enroulement peut être également localisé en appliquant soit la méthode de la division en parties soit la méthode d'alimentation en courant continu.

La division en parties consiste en ce qu'on détermine au mégohmmètre tout d'abord la phase mise à la masse et l'on la divise ensuite en deux parties égales, en dessoudant les connexions entre bobines et on détermine, toujours au mégohmmètre, la partie de l'enroulement mise à la masse. Une telle division est poussée jusqu'à l'instant où l'on recherche le groupe de bobines ou la bobine en panne. Tout en vérifiant au mégohmmètre il est recommandé de remuer les bobines. Une variation de la déviation du mégohmmètre indiquera une mise à la masse de la partie remuée de la bobine.

La méthode d'alimentation en courant continu dont le schéma est représenté par la fig. 19 consiste en ce que les deux extrémités de la phase mise à la masse sont reliées entre elles et branchées sur l'une des bornes d'un réseau à courant continu ou d'une batterie d'accumulateurs. La

deuxième borne de la source de courant continu est reliée à la masse de la machine. Pour pouvoir limiter et régler l'intensité du courant, on prévoit un rhéostat. La source de courant continu ne doit pas être mise à la terre et si l'un de ses pôles l'est tout de même, c'est celui-là qu'on doit relier à la masse de la machine.

Lorsque l'enroulement est mis à la masse, les sens des courants dans ses deux parties séparées par le point de mise à la masse, seront opposés. Si l'on applique les deux fils

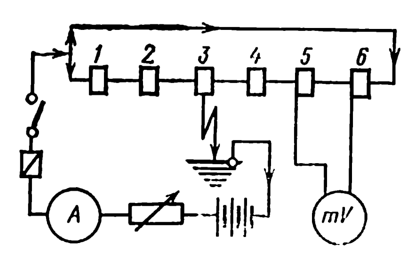


Fig. 19. Schéma pour la localisation d'une mise à la masse d'un enroulement à courant alternatif

venant d'un millivoltmètre successivement sur les extrémités de chaque groupe de bobines, l'aiguille de l'appareil déviera toujours dans le même sens jusqu'à l'instant où les fils de l'appareil ne passent les extrémités d'un groupe de bobines comportant une mise à la masse. Dans ce dernier cas, l'aiguille de l'appareil dévie en sens inverse. Aux extrémités du groupe de bobines défectueux le sens de déviation de l'aiguille de l'appareil sera déterminé par l'extrémité qui se trouve le plus près de l'endroit de mise à la masse. En outre, la chute de tension entre les extrémités du groupe de bobines mis à la masse sera plus faible que pour les autres bobines, si le point de mise à la masse ne se trouve pas au voisinage des extrémités de cette bobine. Pour localiser une bobine défectueuse, on procède de la même façon que précédemment.

La fig. 20 illustre des cas de mise à la masse de l'un des groupes de bobines. En laissant inchangé le schéma d'alimentation en courant continu, on mesure successivement les chutes de tension entre les points suivants: *a—b*, *b—c*, *c—d*, *d—e* et on observe le sens dans lequel dévie l'aiguille de l'appareil. La déviation de l'aiguille de l'appareil branché entre les points *a* et *b* sera opposée à la déviation entre les points *c—d* et *d—e*, alors que pour les points *b—c*, le sens de déviation dépendra de l'endroit où se trouve

le point de mise à la masse. Quant à la chute de tension, elle sera dans ce dernier cas, plus faible qu'entre les bornes des autres bobines. Pour mesurer la chute de tension, on peut soit dénuder les conducteurs de connexion soit utiliser des sondes pointues pouvant perforer l'isolant.

L'endroit de défaut à la masse peut être également localisé à l'aide d'une aiguille aimantée si l'on assure son déplacement le long de chaque encoche: dès que l'aiguille passe

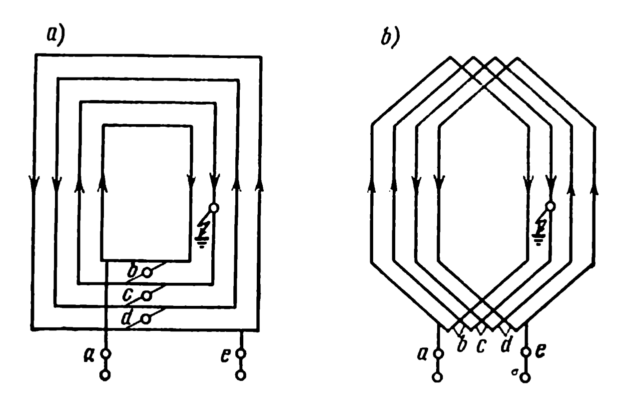


Fig. 20. Mise à la masse de l'une des bobines du groupe:
a: enroulement à bobine simple; *b*: enroulement à deux couches

en regard du point de mise à la masse, sa déviation est inversée. Un tel essai exige de procéder au démontage de la machine. En outre, pour obtenir un bon résultat, il faut assurer un contact métallique au point de mise à la masse. On y arrive par brûlure.

4. Procédés de dépannage des enroulements à courant alternatif. Pour la remise en état des enroulements à courant alternatif, on se guide des mêmes considérations que lors du dépannage des enroulements d'induit dans les machines à courant continu.

En cas d'urgence, on peut tolérer, comme mesure temporaire, le débranchement de la bobine en mauvais état. La bobine débranchée doit être bien isolée (et dans le cas d'un court-circuit entre spires, elle doit être découpée) ou entièrement éliminée des encoches. Les encoches ainsi libérées doivent être remplies avec des cales en bois. Le nombre de spires débranchées ne doit pas dépasser 10 % du nombre

total de spires dans une phase. Un tel débranchement n'est possible que lorsque toutes les bobines de la même phase sont connectées en série et les phases sont couplées en étoile. Si les bobines sont connectées en parallèle ou les phases sont couplées en triangle, le débranchement des bobines d'une phase devient inadmissible, étant donné que l'asymétrie des branches parallèles ou des phases fera naître dans l'enroulement des courants égalisateurs très intenses. Dans ce dernier cas, il faut débrancher un nombre correspondant de bobines également dans les autres phases ou les groupes parallèles. En le faisant, il est désirable de débrancher les bobines décalées par rapport aux bobines avariées de kZ/p encoches dans les autres groupes parallèles, et de $kZ/3p$ encoches dans les autres phases, k étant des nombres entiers.

Dans le cas d'un alternateur, le débranchement des bobines dans une phase n'est possible que lorsque la machine fonctionne de façon autonome et non en parallèle avec d'autres alternateurs.

5. **Défauts dans les enroulements d'excitation.** Pour localiser les défauts dans les enroulements d'excitation des machines à courant alternatif, on applique les mêmes procédés que ceux utilisés pour la recherche des défauts dans les enroulements inducteurs des machines à courant continu.

Pour localiser des courts-circuits entre spires dans les enroulements rotoriques des machines à pôles saillants par la méthode d'alimentation en courant alternatif (voir annexe 8, A-5), on utilise suivant le nombre de pôles une tension de l'ordre de 120 à 500 V. Si une telle tension n'est pas disponible, on peut diviser les bobines en groupes.

Pour pouvoir appliquer cette méthode aux rotors de turbo-alternateurs, il est nécessaire d'enlever au préalable les frettes et d'alimenter l'enroulement statorique sous une tension de 110 à 120 V depuis une source à courant alternatif. Puis en employant des sondes pointues d'acier (aiguilles) qui servent à perforer l'isolation on mesure la tension sur les différentes bobines. Ces mesures s'avèrent nécessaires même dans les cas où certains défauts sont localisés par visite superficielle, car l'enroulement peut comporter d'autres défauts cachés.

Pour déterminer les rapports qui existent entre la tension aux extrémités de la bobine comportant des spires en court-circuit et les tensions aux extrémités des bobines en bon état, on a effectué un essai approprié [32].

Dans la bobine inductrice n° 6 d'un alternateur synchrone hexapolaire, on a mis en court-circuit une à dix spires pour le nombre total de spires dans la bobine égal à 118 et on a mesuré les tensions sur les différentes bobines (tableau 1).

Tableau 1

Tension totale appliquée, V	Intensité du courant, A	Numéros des bobines — tension, V: 1	2	3	4	5	6	Nombre de spires en court-circuit dans la bobine n° 6
726	22,35	123	121	124	120	122	122	0
722	23,65	123	127	130	127	122	99	1
725	24,9	125	132	134	133	125	60	3
725	25,9	127,9	141	140	140	128,5	51	7
725	26,5	130	141	140	140	128	47	10

L'examen des résultats de cet essai montre que la mise en court-circuit d'une seule parmi les 118 spires de la bobine, c'est-à-dire moins qu'un pour cent du nombre total de spires, peut être facilement détecté à l'aide du courant alternatif d'après une différence prononcée des tensions sur les différentes bobines. Quant à l'essai en courant continu il ne permettrait pas de localiser une mise en court-circuit entre un si petit nombre de spires. L'effet démagnétisant dû au courant induit dans les spires court-circuitées de la bobine n° 6 a pour résultat que la tension sur les bobines voisines n° 1 et n° 5 subit aussi une baisse par rapport à celle des bobines plus éloignées n°s 2, 3 et 4.

Pour cet essai, le rotor doit être sorti du stator parce que dans une machine assemblée le stator peut devenir le siège des tensions induites élevées, pouvant présenter un danger.

Au lieu d'essayer le rotor sorti du stator, on peut brancher, pour une courte durée le stator avec le rotor rentré, le circuit d'excitation étant coupé, sur le réseau à courant alternatif de tension réduite dont la valeur ne doit pas dépasser 15 à 20 % de la tension nominale. Dans ces conditions l'intensité du courant dans le stator des machines multipolaires ne dépasse généralement pas 25 à 50 % du courant nominal.

Vu que le champ du stator induit une force électromotrice dans l'enroulement rotorique, les spires en court-circuit sont parcourues par un courant de forte intensité si bien que l'endroit de défaut peut être localisé d'après un échauffement exagéré. L'endroit de mise en court-circuit entre spires peut être également recherché en mesurant la tension aux bornes des différentes bobines : la tension sur les bobines défectueuses sera nettement inférieure à celle sur les bobines saines. Lors d'un tel essai, le rotor peut être mis sous une tension élevée de sorte que le contact avec l'enroulement rotorique ou les bagues collectrices du rotor présente un danger de mort.

Le procédé de localisation de courts-circuits entre spires que nous venons de décrire donne de bons résultats dans le cas où les courts-circuits dans les bobines sont stables (aussi

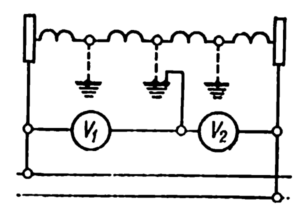


Fig. 21. Schéma pour la localisation d'un court-circuit intermittent entre spires de l'enroulement rotorique d'une machine synchrone

bien lors de la rotation du rotor qu'après son arrêt). Il est sensiblement plus difficile de localiser un court-circuit entre spires dans le cas où il est intermittent et ne se produit que sous l'effet des forces centrifuges lorsque le rotor tourne. Dans de tels cas, si l'examen externe ne permet pas de localiser l'endroit de défaut, il convient d'emmancher sur l'arbre une bague collectrice auxiliaire et de monter un balai auxiliaire pour pouvoir mesurer la tension sur les différentes bobines. Au lieu d'une bague auxiliaire, on peut utiliser également l'arbre lui-même. On fait des prises avec des fils de contrôle sur toutes les connexions entre bobines et on applique successivement ces fils sur la bague auxiliaire (ou sur l'arbre) en branchant le premier celui des fils qui vient du milieu de l'enroulement d'excitation (fig. 21). Les autres fils de contrôle sont isolés et fixés avec sûreté sur l'arbre pour qu'ils ne puissent pas se détacher lors de la rotation du rotor. Après ces opérations préliminaires on fait passer dans le rotor, à travers les bagues collectrices, un courant alternatif depuis une source de 120 à 150 V

(dans le cas d'un alternateur à pôles saillants) et on mesure à l'aide de deux voltmètres V_1 et V_2 (fig. 21) la tension entre chaque bague collectrice et l'arbre (ou la bague auxiliaire). Si les deux tensions sont identiques, le rotor étant immobile, c'est l'indice qu'il n'y a pas de court-circuit entre spires. Lorsque le rotor est mis en rotation, les indications des voltmètres deviennent différentes à l'instant où se produit un court-circuit entre spires et la tension, sur la moitié de l'enroulement comportant une bobine défectueuse, est inférieure à la tension sur la moitié en bon état.

Cette mesure peut être également effectuée à l'aide d'un seul voltmètre en le branchant successivement entre chacune des bagues collectrices et l'arbre (ou la bague auxiliaire). A l'instant où se produit un court-circuit entre spires, les indications du voltmètre varient par bond et la tension sur la partie saine de l'enroulement augmente, alors que celle sur la partie défectueuse diminue. Il va de soi que le voltmètre à utiliser pour ces mesures doit être suffisamment sensible.

Après cela, pour rechercher la partie de l'enroulement qui comporte une bobine défectueuse, on branche successivement sur la bague collectrice (ou sur l'arbre) les fils de contrôle venant des autres bobines et, en mesurant les tensions, on détermine avec précision la bobine défectueuse.

Pour ces mesures il est nécessaire d'utiliser des balais auxiliaires en tresse de cuivre en les plaçant sur les bagues.

L'emploi des balais conducteurs de courant pour la mesure des tensions peut réduire brusquement la précision de ces mesures, étant donné que la résistance de contact entre la bague et le balai n'est pas stable.

L'utilisation de la méthode considérée pour la localisation d'un court-circuit intermittent entre spires, dans les enroulements rotoriques des turbo-alternateurs, fait naître de grandes difficultés et peut notamment exiger d'enlever plusieurs fois et de remettre en place les frettages ce qui est pratiquement inacceptable.

Une mise à la masse de l'enroulement rotorique peut être localisée, dans le cas où elle est stable, en procédant comme suit.

On fait passer dans l'enroulement un courant continu à travers les bagues collectrices et par l'intermédiaire d'une résistance de réglage, d'une valeur telle que l'intensité du courant ne dépasse pas sa valeur nominale, et on mesure

la tension entre les deux bagues et l'arbre. On compte, proportionnellement à la valeur des tensions mesurées, le nombre de bobines ou de spires et on détermine de façon approchée l'endroit de défaut à la masse.

Dans le cas où ce procédé ne permet pas de localiser avec précision l'endroit de mise à la masse, on mesure à l'aide des aiguilles d'acier la tension entre le fer et les différentes spires (en procédant avec prudence pour ne pas abîmer l'isolation lors de sa perforation). La mise à la masse a lieu dans la spire dont la tension par rapport au fer est nulle.

L'emploi de ce dernier procédé pour l'essai de l'enroulement rotorique d'un turbo-alternateur exige d'enlever une frette du rotor.

Du fait que la localisation d'un défaut à la masse de l'enroulement rotorique d'un turbo-alternateur est une opération fort complexe, il est nécessaire, avant de procéder à la réparation, de vérifier s'il n'y a pas de mise à la terre du circuit d'excitation en dehors des limites de l'enroulement rotorique.

Le tableau de commande comporte généralement un schéma spécial pour la détermination, au cours de l'utilisation (voir annexe 10, fig. 2) de la résistance d'isolement du circuit d'excitation à l'aide d'un voltmètre.

En observant attentivement, lors des commutations, la valeur et la polarité des indications du voltmètre prévu dans ce schéma, on peut déterminer en cas d'une faible valeur de la résistance d'isolement, non seulement le pôle mais également la partie du circuit d'excitation présentant un défaut à la terre.

Si la tension U_2 ou U_3, voisine de zéro, a la même polarité que celle de la tension U, cela signifie que l'endroit de mise à la masse de l'enroulement rotorique se trouve au voisinage de la bague correspondante et au contraire, si les indications sont de polarité opposée à celle de U, la mise à la terre du circuit d'excitation se situe en dehors de l'enroulement rotorique. Dans ces derniers cas, il est recommandé de retirer tous les balais de leurs gaines et pour faire une conclusion définitive sur l'endroit de mise à la terre il convient de mesurer, à la vitesse de rotation nominale du rotor tout d'abord la résistance d'isolement entre l'enroulement rotorique et la terre, en branchant l'un des pôles du mégohmmètre à la bague collectrice, à l'aide d'un balai de cuivre isolé

de la couronne porte-balais, et ensuite la résistance d'isolement de l'autre partie (immobile) du circuit d'excitation.

Les résultats de ces mesures permettront de déterminer le pôle et la partie du circuit comportant une mise à la terre.

S'il est établi que la mise à la terre s'est produite dans l'enroulement rotorique, il est recommandé d'appliquer la méthode suivante pour préciser l'endroit de défaut [20].

On fait passer dans l'arbre du rotor *1* (fig. 22) un courant continu, depuis une génératrice *2*, à basse tension. L'intensité du courant doit être de l'ordre de 1000 A. En traversant

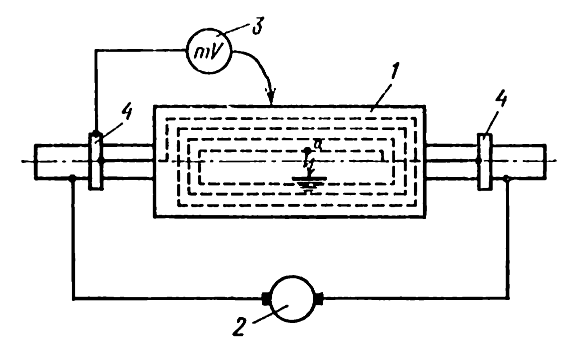


Fig. 22. Schéma pour la localisation d'une mise à la masse de l'enroulement rotorique d'un turbo-alternateur

l'arbre, le courant produit une chute de tension sur toute sa longueur alors que l'enroulement rotorique qui est en contact avec le corps du rotor (au point *a*) sera porté, sur toute sa longueur, à un seul et même potentiel égal à celui du point de mise à la masse. Aussi, en branchant l'un des fils venant du millivoltmètre *3* à l'une des bagues collectrices *4* et en appliquant l'autre fil, terminé par une pointe, sur le corps du rotor, peut-on mesurer la chute de tension sur toute la longueur du rotor et donc rechercher le point où les indications de l'appareil seront nulles. C'est dans la section du rotor perpendiculaire à son axe et passant par ce point, que se trouve la mise à la masse. On voit donc que cette méthode ne permet pas non plus de localiser avec précision l'endroit de défaut à la masse de sorte qu'on doit avoir recours à la méthode de division de l'enroulement en parties, en ouvrant à cet effet toute une série d'encoches.

Si le défaut à la masse est instable, c'est-à-dire s'il se produit seulement lors de la rotation du rotor, on utilise les tensions mesurées entre l'arbre et les bagues collectrices à la vitesse nominale de rotation du rotor et on détermine approximativement, à partir de ces tensions, l'endroit de défaut à la masse après quoi, on le localise par l'examen externe. Dans les rotors des turbo-alternateurs, il convient de chercher l'endroit de défaut dans la partie supérieure de l'enroulement, au-dessous des cales d'encoche ou au-dessous des frettes du rotor étant donné que l'enroulement est fortement pressé contre ces parties sous l'effet des forces centrifuges et son isolation peut donc être écrasée. Un autre endroit où il convient de chercher le défaut est la sortie de l'enroulement de ses encoches.

On constate parfois que la résistance d'isolement est plus faible lorsque le rotor est à l'arrêt que s'il est en rotation. Dans de tels cas, l'endroit de défaut doit être recherché sur le fond des encoches et sur les surfaces d'appui dans les têtes des bobines.

Pour déterminer si un défaut à la masse de l'enroulement est dû à son déplacement lors de la rotation du rotor il convient de relever une courbe traduisant la variation de la résistance d'isolement de l'enroulement en fonction de la vitesse de rotation.

Dans de nombreux cas, la méthode la plus efficace permettant de localiser l'endroit de mise à la masse, est la méthode de « brûlure ». A cet effet, on fait passer un courant continu ou un courant alternatif depuis un réseau d'éclairage, par exemple, entre une bague collectrice et l'arbre, à travers le circuit comprenant une résistance de limitation de courant, un ampèremètre et un coupe-circuit ou un disjoncteur à maximum. Si la tension du réseau d'éclairage disponible s'avère insuffisante, il faut appliquer une tension plus élevée (500 V et davantage). L'endroit de mise à la masse est, dans ce cas, déterminé par l'apparition d'étincelle ou de fumée.

Si, malgré l'absence d'étincelle ou de fumée, l'ampèremètre montre le passage du courant, il convient de limiter la durée de ce passage. Cela est nécessaire pour éviter une carbonisation excessive des isolants et la brûlure du cuivre à l'endroit de mise à la masse.

Avant de procéder à l'essai de brûlure, il convient de nettoyer avec soin le rotor à l'air comprimé pour éviter

l'inflammation des impuretés qui se sont déposées sur l'enroulement et le fer.

Dans le cas des rotors des turbo-alternateurs, la méthode de brûlure ne peut être appliquée qu'en prenant toutes les précautions en vue de protéger le frettage du rotor contre la fusion par l'arc électrique.

ANNEXE 9

Courants parasites dans l'arbre et dans les paliers

A. Causes de courants parasites

Les courants parasites dans les paliers de machines électriques peuvent être provoqués par des diverses causes. Ce phénomène se rencontre le plus souvent dans les grosses machines synchrones et, plus rarement, dans les moteurs asynchrones et les machines à courant continu.

Les courants dans les paliers présentent un danger qui réside en ce que les petits arcs électriques qui se produisent dans la couche d'huile entre les tourillons de l'arbre et les coussinets attaquent la surface des tourillons et des coussinets, en transportant le métal antifriction sur les tourillons de l'arbre ce qui entraîne, à la longue, un échauffement anormal des paliers et même la fusion de la couche régulée. En outre, l'action électrolytique due au courant altère l'huile en provoquant son noircissement ce qui augmente également l'échauffement des paliers.

Les mêmes détériorations des tourillons de l'arbre et des coussinets peuvent être provoquées par d'autres causes de nature non électrique parmi lesquelles il convient de citer: une mauvaise qualité du garnissage des coussinets, la présence d'eau dans l'huile, l'acidité de l'huile, les conditions anormales de fonctionnement des coussinets, etc. Aussi, pour rechercher la cause réelle des défectuosités convient-il souvent d'appliquer la méthode d'exclusion successive des causes possibles.

Dans ce qui suit, nous analysons les principales causes provoquant l'apparition de courants parasites dans l'arbre et dans les paliers de machines électriques.

1. Asymétrie du champ magnétique de la machine. L'asymétrie du champ magnétique peut provoquer lors de la

rotation du rotor un flux pulsatoire dans le circuit fermé comprenant l'arbre du rotor *1* (fig. 1), les paliers *2*, le socle *3* et les jeux d'huile des paliers. La résistance électrique de ce circuit étant très faible, la f.é.m. induite, même de faible valeur provoque la circulation de courants considérables.

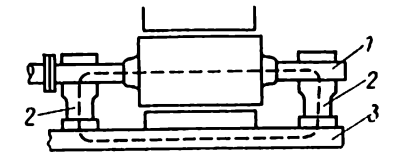


Fig. 1. Trajet des courants dans les paliers d'une machine électrique

La f.é.m. induite peut atteindre plusieurs dixièmes de volt et, dans certains cas, même plusieurs volts. Quand la machine électrique est accouplée avec une autre machine, le courant dû à la f.é.m. induite peut provoquer une détérioration des paliers ou des autres parties de la machine accouplée.

L'asymétrie du flux magnétique est bien souvent consécutive à des défauts de construction ou à des causes ayant

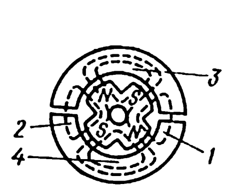


Fig. 2. Lignes magnétiques en présence de joints dans le fer statorique

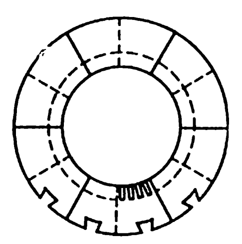


Fig. 3. Joints dans les segments de fer statorique

trait à l'exploitation de la machine. Parmi les causes relevant de la construction, il convient de signaler notamment la présence de joints dans le fer actif en cas du stator démontable ou la présence dans ce dernier, des canaux axiaux de ventilation. En présence de joints (fig. 2), le nombre de lignes de force magnétiques qui se ferment à travers les joints (les lignes *1* et *2*) peut se trouver inférieur au nombre de lignes de force magnétiques qui se ferment à travers les autres parties du système (les lignes *3* et *4*). La présence de joints dans les segments du fer statorique (fig. 3) peut aussi être cause des courants dans les paliers.

Parmi les causes relevant de l'exploitation on peut citer par exemple une longueur inégale de l'entrefer entre le rotor et le stator ainsi que des courts-circuits dans les bobines inductrices provoquant une asymétrie magnétique. En cas d'un entrefer irrégulier (fig. 4), les lignes magnétiques cherchent à se fermer en empruntant le chemin de moindre résistance, en enveloppant l'arbre de rotor. Lors de la rotation du rotor, le circuit (arbre — paliers — socle) est traversé par un flux magnétique variable et est donc le siège d'une f.é.m. induite.

2. Induction homopolaire. Les courants dans les paliers peuvent être également engendrés par l'aimantation longitudinale de l'arbre d'une machine synchrone en cas de court-circuit d'une partie de spires dans l'un des pôles de sorte

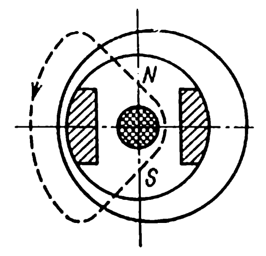


Fig. 4. Trajet des lignes magnétiques en cas d'un entrefer irrégulier entre le rotor et le stator

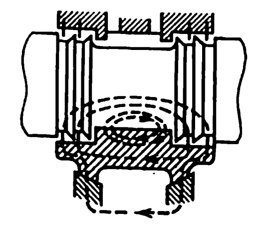


Fig. 5. Courant local dans le tourillon de l'arbre et dans le palier provoqué par une induction unipolaire

qu'une partie du flux magnétique se ferme à travers les tourillons de l'arbre, les paliers et le socle. Lorsque l'arbre de la machine tourne, l'induction homopolaire fait apparaître un courant continu local qui se ferme à travers le tourillon de l'arbre dans les paliers (fig. 5). Une aimantation longitudinale de l'arbre peut être également produite par l'effet magnétisant des conducteurs de prise de courant se trouvant à proximité de l'arbre.

Les mesures qu'on prend habituellement pour lutter contre les courants dans les paliers, à savoir l'isolation des bâtis de paliers du socle de la machine n'empêchent pas la circulation des courants dus à l'induction homopolaire.

Pour supprimer ou réduire les courants provoqués par l'induction homopolaire, il convient de désaimanter l'arbre

(voir plus loin section D du présent annexe) ou de modifier la disposition des conducteurs de courant.

3. **Court-circuit dans l'enroulement du rotor (de l'induit) à travers les paliers.** Ce phénomène s'observe en cas de court-circuit entre l'enroulement rotorique (induit) et l'arbre et de mise à la terre simultanée du circuit extérieur du rotor. La fig. 6 illustre un tel cas pour le rotor d'un turbo-alternateur. Par suite du court-circuit entre l'enroulement rotorique et le tambour de rotor au point *a* et de la mise à la terre

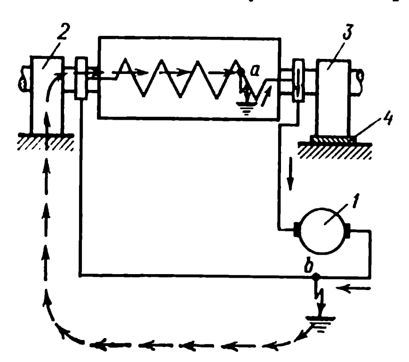


Fig. 6. Court-circuit dans l'enroulement rotorique d'un turbo-alternateur provoqué par une mise à la masse de l'enroulement simultanée avec une mise à la terre du circuit d'excitation :

1 : excitatrice ; *2* et *3* : paliers du turbo-alternateur ; *4* : isolation du palier

au point *b* du circuit de l'excitatrice *1* un courant circule à travers le palier *2* non isolé (le chemin du courant est indiqué par des flèches).

Dans de tels cas, la détérioration des tourillons de l'arbre et des coussinets des paliers peut être si importante qu'une réparation immédiate de la machine devient nécessaire.

4. **Charge électrique des rotors des turbo-alternateurs par la vapeur.** La charge du rotor de la turbine par la vapeur provoque l'apparition d'une haute tension sur l'arbre de rotors du groupe de machines. Sa valeur dépend de l'état du film d'huile par lequel la charge s'écoule vers la terre. Parfois, on observe des étincelles qui jaillissent entre l'arbre et les paliers. La mesure de la résistance d'isolement montre que l'isolation du palier est en bon état. Quant à la tension entre l'arbre et la carcasse de la machine une fois mesurée à l'aide d'un voltmètre magnéto-électrique à forte résistance interne (200 000 Ω et plus) elle s'avère supérieure à la tension entre les bagues du rotor. Les pointes de tension sur les oscillogrammes atteignent une valeur de 400 V et même davantage. Les résultats de mesures dépendent fortement de la résistance interne du voltmètre utilisé. Lorsque les

mesures sont faites avec un voltmètre présentant une résistance interne plus faible, la valeur de la tension obtenue baisse et si l'on place une lampe à incandescence entre l'arbre et la carcasse de l'alternateur les déviations du voltmètre tombent jusqu'à zéro et la lampe ne s'allume pas. Malgré la valeur importante des tensions dues aux charges électrostatiques, le courant qui en résulte ne présente généralement aucun danger parce que la puissance de la source est très faible.

Pour que le personnel d'entretien n'éprouve pas de sensation désagréable en cas de contact avec l'arbre de la machine, il est recommandé de prévoir sur l'arbre, du côté de la turbine, un balai mis à la terre à travers une résistance de l'ordre de 100 ohms.

De toutes les causes provoquant l'apparition de courants parasites que nous venons de considérer, le plus grand danger provient des courants dus à l'asymétrie du champ magnétique de la machine.

B. Suppression de courants parasites

L'une des méthodes principales permettant de supprimer dans les paliers les courants parasites provoqués par le flux magnétique pulsatoire se fermant par le circuit, (arbre — paliers — socle) consiste à isoler les bâtis de paliers du socle de la machine pour interrompre le circuit du courant. La disposition généralement adoptée des garnitures isolantes interposées sous les bâtis de paliers de divers machines et groupes, est représentée par la fig. 7 sur laquelle la lettre *T* désigne les machines à courant alternatif et la lettre *D* les machines à courant continu ; les garnitures isolantes étant représentées en traits forts.

Lorsque la machine électrique est accouplée à son moteur d'entraînement ou à un organe entraîné (fig. 7, *a*), on isole le palier avant (du côté opposé à l'accouplement) aussi bien dans le cas où les machines sont montées sur un socle commun que dans le cas où elles sont placées sur des socles différents. L'isolation des bâtis de paliers dans le cas de groupes comprenant plusieurs machines installées sur un socle commun, est représentée, pour leurs diverses positions relatives, par les fig. 7, *b*, *c* et *d*. Dans les machines synchrones couplées directement à d'autres machines et comportant

une excitatrice montée sur le socle commun avec la machine principale (l'excitatrice étant accouplée directement à la machine principale), on isole le palier de la machine principale et les paliers de l'excitatrice (fig. 7, *e*). Dans les compensateurs synchrones qui fonctionnent sans accouplement

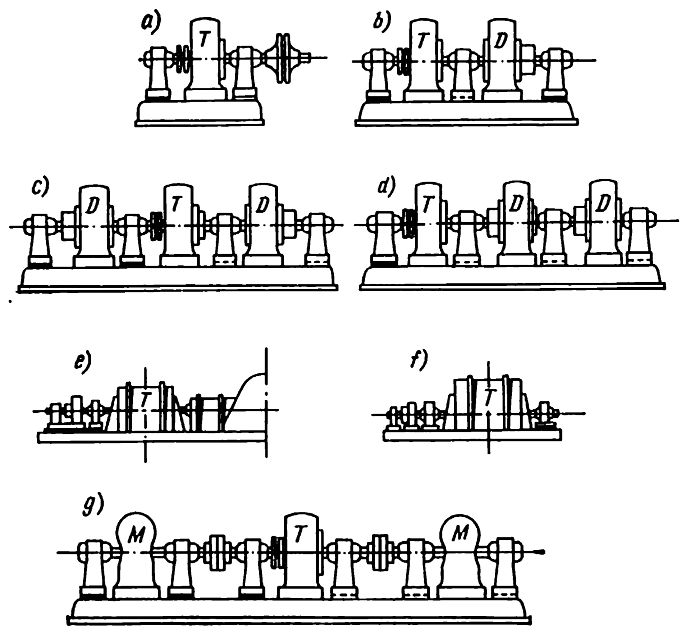


Fig. 7. Placement des cales isolantes en vue d'éviter le passage des courants dans les paliers

avec d'autres machines ou sont montés sur le socle commun avec l'excitatrice, on isole les paliers du côté opposé à l'excitatrice (fig. 7, *f*).

L'isolation des paliers d'un moteur à courant alternatif monté sur un socle commun avec deux machines d'utilisation *M* qu'il entraîne, est montrée sur la fig. 7, *g*. Pour l'isolation des bâtis de paliers on utilise des feuilles de guétinax ou de textolite épaisses de 2 à 5 mm. Les garnitures isolantes doivent émerger de 5 à 10 mm des limites des bâtis, suivant tout le pourtour.

En plus des garnitures isolantes principales (interposées entre les bâtis et le socle) on isole encore les boulons qui

fixent les bâtis sur le socle et les goupilles coniques de contrôle.

La fig. 8 montre l'isolation principale et l'isolation des boulons de fixation du bâti de paliers. Entre le socle *1* et le bâti *2* on interpose une feuille de guétinax *3*; le boulon est isolé par un tube *4* en bakélite de 2 mm d'épaisseur. La rondelle isolante *5* en guétinax est enfilée sur le tube *4*; le diamètre intérieur de la rondelle doit être égal au diamètre extérieur du tube; le diamètre extérieur de la rondelle

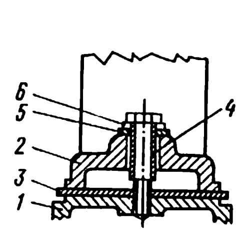


Fig. 8. Isolation d'un bâti de palier

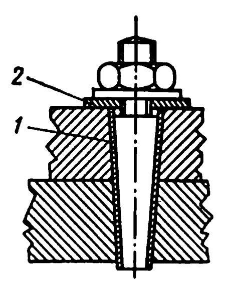


Fig. 9. Isolation d'une goupille de contrôle

isolante doit être légèrement supérieur de la rondelle métallique *6*; le tube *4* doit être monté au ras de la rondelle métallique et doit émerger de la paroi du bâti.

L'isolation de la goupille de contrôle (fig. 9) est constituée par le carton isolant *1* enrobant la goupille et la rondelle *2* en textolite. Etant donné que les goupilles doivent être ajustées à leurs logements, on utilise, en plus des goupilles isolées, encore des goupilles non isolées pour obtenir la dimension totale de l'orifice conique; ces goupilles servent au goupillage temporaire, après quoi les goupilles auxiliaires sont remplacées par des goupilles isolées.

Pour interdire le passage des courants de paliers par d'autres trajets shuntant les garnitures isolantes, on assure également l'isolation de la canalisation d'huile (fig. 10). A cet effet, on interpose entre les brides une garniture isolante circulaire en guétinax ayant un diamètre légèrement supérieur à celui de la canalisation. La partie isolée du tube ne doit pas avoir de connexion métallique avec le socle de la machine. La fig. 11 montre l'isolation des brides d'une conduite d'huile; elle se compose des tubes *1* en papier

bakélisé et des rondelles *2* en guétinax ; la garniture *3* interposée entre les brides est aussi en guétinax.

Il existe également des constructions des raccordements par brides qui n'exigent pas d'isoler les boulons par des tubes et rondelles.

Dans le cas de paliers refroidis par circulation d'eau, la canalisation d'amenée d'eau aboutissant au bâti de paliers isolé doit comporter une insertion sous forme d'un tube en caoutchouc ayant la même section et long de 100 mm au moins. Le tronçon de canalisation d'eau relié au bâti ne doit pas avoir lui, non plus, de connexion métallique avec le socle de la machine.

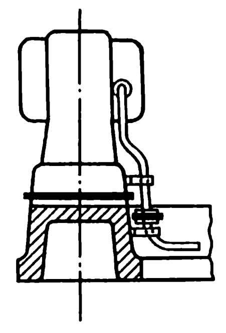


Fig. 10. Isolation de la canalisation d'huile du bâti de palier

Fig. 11. Isolation des brides de raccordement de la canalisation d'huile

C. Vérification du bon état de l'isolation des paliers

Le bon état de l'isolation des paliers doit être vérifié, au cours de l'utilisation, à des délais prescrits.

Cette vérification est à faire aussi bien sur une machine à l'arrêt qu'au cours de son fonctionnement. La détermination de la résistance d'isolement de la machine doit s'effectuer aussi bien en marche à vide qu'en charge, par la mesure des tensions en appliquant la méthode décrite ci-dessous.

Les mesures se font au voltmètre de calibre 3 à 10 V. Dans le cas de turbo-alternateurs, le voltmètre à utiliser doit avoir une résistance interne aussi faible que possible, autrement dit, consommer un courant important. La réalisation de cette condition est nécessaire pour se défaire des

courants dus aux charges électriques du rotor puisqu'ils peuvent affecter les indications de l'appareil. Si un tel voltmètre manque, on peut utiliser un appareil ordinaire en le branchant du côté de l'enroulement de 220 V à un transformateur de sécurité 220/12 V. On effectue deux mesures. Pendant la première (fig. 12, *a*) les fils venant du voltmètre, sont branchés sur deux balais en tresse de cuivre fixés sur des poignées isolantes; les balais sont appliqués contre les bouts de l'arbre. Pendant la deuxième mesure

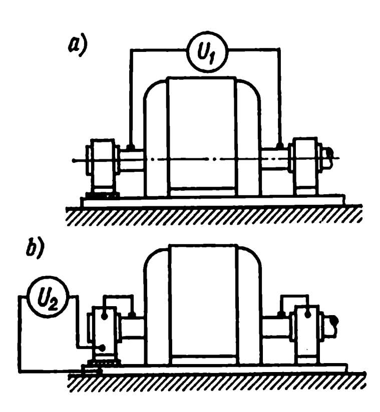


Fig. 12. Vérification du bon état de l'isolation des paliers

(fig. 12, *b*) on détermine la tension entre le socle de la machine et le corps de palier, les films d'huile étant mis en court-circuit. Chacun des courts-circuits est relié par une extrémité au palier et par la deuxième extrémité au balai en tresse de cuivre appliqué sur l'arbre. Si l'isolation du palier est en bon état, les tensions U_1 et U_2 doivent être identiques. En cas de défectuosités dans l'isolation, la tension U_2 est inférieure à U_1. En cas d'une brusque diminution de la résistance d'isolement, il convient de procéder à une visite détaillée pour remettre en état l'isolation avariée.

Les tensions sur l'arbre mesurées en marche à vide et en marche en charge diffèrent l'une de l'autre.

Après le montage de la machine et les grosses réparations, on vérifie la résistance d'isolement de tous les paliers isolés, les conduites d'huile étant complètement assemblées.

A cet effet, on soulève, à l'aide d'une grue, le bout de l'arbre se trouvant du côté opposé au palier isolé et on interpose entre le tourillon de l'arbre et le coussinet ainsi qu'entre l'arbre et le câble de la grue des garnitures isolantes

et on mesure la résistance d'isolement au mégohmmètre sous la tension de 1000 V.

La résistance d'isolement ne doit pas être inférieure à 1 mégohm. Pour mesurer la résistance d'isolement on pourrait soulever le bout d'arbre qui tourne dans le palier isolé mais dans le cas des rotors pesants il est nécessaire de charger ce palier pour que la mesure puisse se faire pour une pression normale sur l'isolation.

Les causes les plus fréquentes qui provoquent la détérioration de l'isolation, sont: l'encrassement extérieur des bords des isolants (ou des joints si l'isolation est constituée par plusieurs parties); le shuntage de l'isolation par la cuirasse du câble venant de l'excitatrice, par la tuyauterie ou par les outils en cas de contact accidentel avec le palier ou le socle de l'excitatrice, etc.; l'encrassement de l'isolation à travers les trous de montage pratiqués dans le corps du palier ou dans la carcasse de l'excitatrice; la présence d'une goupille de centrage non isolée, oubliée dans son logement; la détérioration de l'isolation entre les brides de la conduite d'huile; le mauvais état des rondelles, garnitures et douilles isolantes des boulons et des goupilles.

On observe le plus souvent le mauvais état de l'isolation entre les brides des canalisations d'huile. Il arrive parfois que les garnitures à l'intérieur des conduites d'huile se trouvent encrassées. Vu toutes ces difficultés que présente la vérification de la résistance d'isolement du palier, il est très utile de munir de tubulures isolées de deux côtés les tuyauteries reliées aux paliers isolés et servant aussi bien à la conduite de l'huile qu'à celle de l'eau. Cela permet de vérifier, au besoin, très vite l'état de l'isolation des tuyauteries lors du fonctionnement du groupe.

Parfois, pour rendre plus facile la vérification de l'isolation du palier lors de la marche de la machine on réalise l'isolation entre le palier et le socle en deux parties séparées par une feuille métallique. En le faisant, on suppose qu'une valeur élevée de la résistance d'isolement entre cette feuille et la terre, témoigne aussi du bon état de l'isolation du palier par rapport à la terre.

Or, une telle supposition n'est pas justifiée parce qu'avec une bonne isolation de la feuille métallique, le palier peut présenter un défaut à la terre, comme il est indiqué plus haut, à travers le boulon de fixation, la goupille ou un autre objet métallique quelconque. D'autre part, la mise

à la terre de la feuille métallique intermédiaire ne signifie pas encore que le palier lui-même est aussi mis à la terre puisque l'isolation peut présenter un défaut seulement sur une face de la feuille. Pour toutes ces raisons, l'emploi d'une isolation composite ne semble pas raisonnable étant donné que la vérification de l'isolation du palier à l'aide de la feuille intermédiaire peut induire en erreur.

En outre, on ne devra perdre de vue que les résultats positifs obtenus lors de la vérification de l'isolation du palier même par des méthodes recommandées plus haut, ne constituent pas une preuve que l'alternateur fonctionne sans courants locaux dans les paliers ou que le palier du côté accouplement n'est pas traversé par un courant dû à une double mise à la terre du circuit d'excitation.

D. Démagnétisation de l'arbre

L'aimantation de l'arbre est dans la plupart des cas sans effet sur le fonctionnement de l'alternateur mais elle peut parfois être à l'origine des courants dans les paliers. En outre, elle crée certains inconvénients lors de l'entretien,

Fig. 13. Démagnétisation d'un arbre en cas d'une même polarité de ces extrémités

de l'inspection ou de la réparation de la machine à cause de l'attraction magnétique des outils.

Pour vérifier si l'arbre est aimanté, on applique un morceau de fer doux sur sa face frontale.

Pour démagnétiser un arbre il convient de procéder comme suit :

1. Retirer le rotor du stator.

2. Déterminer à l'aide d'une aiguille aimantée, la polarité des bouts de l'arbre. Deux cas peuvent se présenter :

a) la polarité des deux bouts d'arbre est la même (fig. 13) ;

b) la polarité des deux bouts d'arbre est différente (fig. 14).

3. Enrouler sur chaque extrémité d'arbre 10 à 15 spires d'un fil bien isolé de 6 à 16 mm² de section.

Le sens de bobinage de ces spires doit être conforme à la polarité déterminée de l'arbre : dans le cas *a* le sens de bobinage sur une extrémité de l'arbre doit être opposé à celui sur la deuxième extrémité (fig. 13) ; dans le cas *b*

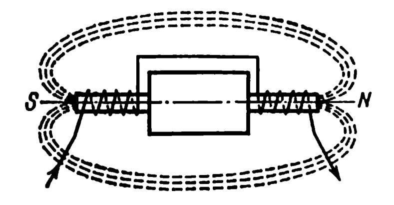


Fig. 14. Démagnétisation d'un arbre en cas de polarités différentes de ses extrémités

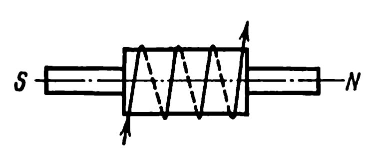


Fig. 15. Spires enroulées sur le tambour de rotor d'un turbo-alternateur pour démagnétiser l'arbre

le sens de bobinage doit être le même sur les deux extrémités d'arbre ; en outre, dans le cas de turbo-alternateurs, on peut enrouler plusieurs spires sur le tambour de rotor lui-même (fig. 15).

4. Faire passer un courant continu dans les spires enroulées sur l'arbre. Etant donné que le nombre d'ampère-tours nécessaire à la démagnétisation de l'arbre ne peut pas être déterminé d'avance, il faut utiliser une source de courant continu à tension réglable. L'intensité du courant nécessaire à la démagnétisation varie de 10 à 50 A suivant le degré d'aimantation de l'arbre. Il convient de commencer la démagnétisation avec une faible intensité du courant et de l'augmenter progressivement jusqu'à ce que l'aiguille aimantée n'indique l'inversion de la polarité aux extrémités de l'arbre.

Une faible aimantation étant inoffensive, on peut la laisser subsister.

ANNEXE 10

Séchage des machines électriques

A. Généralités

Les machines électriques doivent être soumises au séchage après leur montage ou dans le cas où la résistance d'isolement de leurs enroulements se trouve abaissée par suite

d'une longue inaction. Dans le premier, cas, le séchage est obligatoire, même si la résistance d'isolement entre les enroulements et la carcasse ainsi qu'entre les enroulements isolés les uns des autres, se trouve satisfaisante. Cela tient à ce que la haute valeur de la résistance d'isolement entre les enroulements et la masse ne garantit pas un bon état de l'isolation entre les spires des enroulements.

En plus de la valeur de la résistance de l'isolement un critère de l'état sec de l'isolation peut être constitué par le rapport des résistances d'isolement mesurées pour des différentes durées d'application de la tension d'essai. A cet effet, on mesure au mégohmmètre la résistance d'isolement au bout de 15 et 60 s après l'instant d'application de la tension pour la même vitesse de rotation de la poignée du mégohmmètre et on détermine le rapport des indications du mégohmmètre :

$$\frac{r_{60}}{r_{15}} = K,$$

où K est le coefficient d'absorption.

La valeur de K est toujours supérieure à l'unité et augmente au fur et à mesure que l'isolation sèche. Pour une isolation parfaitement sèche, elle peut atteindre 2 à 3. La valeur de ce coefficient dépend aussi de la température de l'enroulement. Lorsque la température augmente, la valeur de K diminue si l'isolation est sèche. On doit avoir en vue que pour obtenir des indications correctes du mégohmmètre, il convient de supprimer des charges résiduelles en mettant l'enroulement à la terre pour quelques minutes avant chaque mesure.

D'après les recommandations de l'usine « Elektrossila » Kirov, les turbo-alternateurs employant un enroulement statorique en barres et une isolation compound de classe B, peuvent être considérés comme secs et donc mis en service sans séchage préliminaire lorsque les conditions suivantes sont réalisées :

1) On est parfaitement sûr qu'au cours du stockage, du transport et du montage de la machine, aucune humidité n'est pénétrée dans les enroulements ;

2) La résistance d'isolement de l'enroulement à la température de 75° C n'est pas inférieure à la valeur donnée par la formule (et en tout cas non inférieure à 0,5 mégohm) :

$$r = \frac{U_n}{1000 + \frac{P}{100}},$$

dans laquelle r est la résistance d'isolement de tout l'enroulement statorique, en mégohms; U_n la tension nominale aux bornes de l'enroulement, en volts; P la puissance nominale de la machine, en kVA;

3) Le coefficient d'absorption K n'est pas inférieur à 1,3.

La résistance d'isolement de l'enroulement rotorique d'un turbo-alternateur à la température de 75° C ne doit pas être inférieure à 0,04 mégohm.

Dans le cas où la température de l'enroulement diffère de 75° C il est admis de calculer la résistance d'isolement

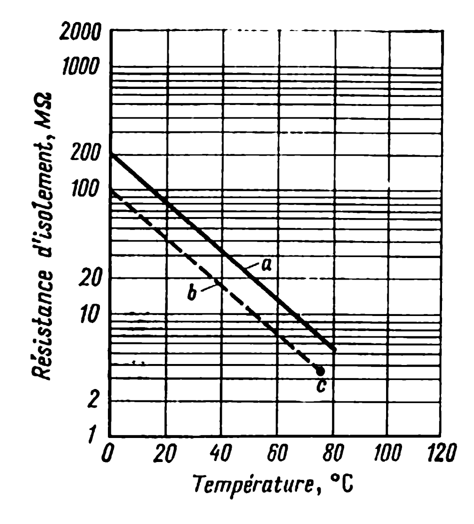


Fig. 1. Variation de la résistance d'isolement en fonction de la température lors du refroidissement de la machine

en par an du fait que la résistance d'isolement diminue de 2 fois tous les 20° C d'élévation de la température.

Les critères qui viennent d'être énumérés peuvent être également utilisés pour d'autres machines synchrones à tension élevée.

Pour vérifier l'état de l'isolation lors de réparation et des inspections de la machine, compte tenu de la température, il convient de comparer les résultats des mesures avec les données obtenues lors de la mise en service de la machine après son séchage.

La fig. 1 montre, en coordonnées semi-logarithmiques, les courbes de variation de la résistance d'isolement de l'enroulement statorique à l'état sec (r_{60}) en fonction de la température lors du refroidissement (la courbe a). On peut

porter sur ce même graphique, la courbe donnant, pour l'état chaud, la valeur admissible de la résistance d'isolement conformément au critère 2 (point *c*). La courbe traduisant la valeur minimale admissible de la résistance de l'isolement en cas d'utilisation de la machine sous des températures plus basses représente une droite *b* parallèle à la droite *a* et tracée à partir du point *c*.

Dans les cas où la machine ne comporte qu'une faible humidification superficielle, due à son arrêt, il est admis de procéder à un séchage de contrôle suivi d'un séchage supplémentaire sous une tension réduite ou lors du fonctionnement à charge partielle avec un enroulement suffisamment froid, en respectant les conditions suivantes:

1) A la température initiale et au cours du séchage supplémentaire de la machine, la résistance d'isolement *r* et le coefficient d'absorption *K* doivent avoir des valeurs non inférieures à celles indiquées dans les critères 2 et 3;

2) La vitesse d'élévation de température de l'enroulement ne doit pas dépasser 4 degrés/heure;

3) Procéder, autant que possible, à des mesures de contrôle de la résistance d'isolement et du coefficient d'absorption (si possible, toutes les deux heures);

4) Lors du séchage complémentaire en charge, la machine ne doit pas être mise à la disposition du dispatching jusqu'à l'instant où sera assuré l'état sec de l'isolation de la machine conformément aux critères indiqués plus haut.

Les petites machines à faible tension peuvent être mises en service sans subir un séchage supplémentaire si la résistance d'isolement entre leurs enroulements et la masse est suffisamment élevée et si l'on peut considérer comme établi que la machine n'a pas pu prendre de l'humidité au cours du stockage ou du transport.

Le séchage a pour but d'éliminer l'humidité des enroulements. Cette élimination de l'humidité contenue dans les isolants des enroulements s'effectue grâce à la diffusion thermique qui provoque le déplacement de l'humidité dans le sens du flux calorifique, c'est-à-dire des parties plus chaudes vers les parties moins chaudes. Ce déplacement se produit par suite de la différence entre l'humidité des diverses couches de l'isolation. Il s'effectue dans le sens des couches à humidité plus élevée vers les couches à humidité plus faible. Cette différence d'humidité provient de la différence de température.

Le séchage de la machine se fait d'une manière d'autant plus intense que la différence de température est plus élevée. C'est pourquoi, en chauffant les parties internes de l'enroulement (par exemple, à l'aide d'un courant électrique), on peut produire une différence de température entre les couches internes et les couches externes de l'isolation et donc favoriser le séchage. Une différence de température peut être également obtenue par un refroidissement rapide périodique des couches extérieures de l'isolation grâce au soufflage périodique de l'air froid suivi d'un échauffement. Ces procédés peuvent être utilisés pour le séchage des enroulements très humides.

Le séchage des machines électriques peut être assuré à l'aide des méthodes différentes: par chauffage extérieur, par chauffage à l'aide d'un courant électrique depuis une source extérieure, par courant de court-circuit, par pertes de ventilation, par pertes dans le fer actif ou dans la carcasse de la machine, etc. Dans les cas où l'application de l'une des méthodes ne permet pas d'obtenir la température de séchage nécessaire ou l'échauffement des différentes parties est irrégulier, on a recours à une méthode combinée, autrement dit, à la combinaison de deux méthodes différentes.

Le choix de la méthode de séchage est déterminé essentiellement par les conditions locales, par les disponibilités et, dans certains cas, par le degré d'humidité de l'isolation. Le séchage le plus intense des enroulements très humides est celui par le courant électrique pendant lequel les couches internes de l'isolation sont plus échauffées que les couches extérieures. Pourtant, le séchage par le courant circulant dans l'enroulement présentant un degré hygrométrique élevé, peut entraîner un gonflement de l'enroulement alors que le séchage d'un tel enroulement par le courant continu peut produire un effet électrolytique. Pour toutes ces raisons, il est recommandé dans de tels cas d'effectuer le séchage par d'autres méthodes et, par exemple, par pertes dans le fer actif, par chauffage extérieur, etc. Après le séchage préliminaire à l'aide de ces méthodes, on peut procéder au séchage par courant électrique.

Avant de procéder au séchage, il est nécessaire de nettoyer la salle des machines des poussières et des impuretés, de visiter et de nettoyer la machine par insufflation d'air comprimé. Avant le séchage par courant électrique, il est nécessaire de vérifier tous les contacts et, dans le cas où le

séchage est lié à la rotation de la machine, de vérifier l'entrefer entre le rotor (induit) et le stator (inducteur) ainsi que les jeux dans les paliers. La carcasse de la machine doit être mise à la terre. Au cours du séchage, il convient d'assurer la ventilation de la machine pour accélérer l'opération de séchage. Pourtant, on ne devra pas oublier qu'une ventilation trop forte empêche l'échauffement de la machine jusqu'à la température voulue.

Pour éviter des pertes de chaleur inutiles lors du séchage, il convient de protéger la machine contre l'air ambiant tout en conservant la ventilation qui favorise l'évacuation de l'humidité. A cet effet, une machine du type ouvert peut être recouverte de planches, de bâches, etc. Aux points le plus haut et le plus bas d'un tel revêtement on pratique des trous de ventilation permettant d'assurer une circulation continue de l'air. Dans les machines fermées il convient d'ouvrir les trapes de visite (dans la carcasse, dans les flasdues, etc).

La température des enroulements et du fer actif est mesurée au cours du séchage, à l'aide des thermomètres placés en plusieurs points. Dans les machines à ventilation en circuit fermé ou par refoulement d'air les thermomètres sont aussi placés dans le courant d'air de sortie et dans celui d'air d'entrée. Si la machine possède des thermodétecteurs incorporés, ceux-ci peuvent être utilisés au lieu des thermomètres.

La température des enroulements peut être également déterminée par la méthode de mesure de la résistance. La température maximale au cours du séchage à l'endroit le plus chaud de l'enroulement ou du fer ne doit pas être supérieure à :

70 °C en cas de mesure par thermomètre ;
90 °C en cas de mesure par résistance ;
80 °C en cas de mesure par thermodétecteur.

La température de l'air sortant de la machine ne doit pas dépasser 65 °C.

L'enroulement et le fer doivent être chauffés progressivement parce qu'en cas d'un échauffement accéléré, la température des parties internes de la machine peut atteindre facilement une valeur dangereuse alors que l'échauffement des parties extérieures sera encore peu considérable. En outre, la différence entre les constantes de temps d'échauffement

et celle entre les coefficients de dilatation thermique de l'enroulement et du fer actif ainsi que des parties constitutives de la machine peuvent causer en cas d'un échauffement accéléré des détériorations (ruptures) de l'isolation et des dégradations mécaniques des carcasses, des rotors et d'autres organes.

Lors du séchage des grosses machines par exemple des turbo-alternateurs et des moteurs de laminoir, la vitesse d'échauffement doit être telle que la température de 50 °C (mesurée au thermomètre) de l'enroulement et du fer ou la température de 40 °C de l'air sortant ne soient pas atteintes plus tôt qu'au bout de 20 à 30 h dès le début du séchage et la température maximale, au bout de 40 à 50 h au minimum.

Pendant le séchage par courant électrique, la croissance nécessaire de la température est obtenue soit par une élévation progressive et par bond du courant soit par une coupure temporaire du courant. On ne doit augmenter l'intensité du courant qu'après l'instant où la température des enroulements s'est établie à un niveau fixe.

Il est aussi nécessaire de mesurer au cours du séchage la résistance d'isolement de tous les enroulements de la machine et, en cas de séchage par courant électrique, l'intensité du courant. Lors du séchage on dresse un procès-verbal et on construit des courbes de variation de la résistance d'isolement et de la température des enroulements en fonction de la durée de séchage. De telles courbes permettent de juger de l'efficacité du séchage (une allure des courbes de séchage est représentée par la fig. 13). Ces mesures sont à effectuer toutes les 20 à 30 mn au début de séchage et chaque heure après que la température atteint une valeur stable. Les mesures de la température et de la résistance d'isolement doivent se poursuivre jusqu'à un refroidissement complet de la machine. Si la machine est séchée par un courant électrique, celui-ci doit être coupé pour la durée de la mesure de la résistance d'isolement. Dans ce dernier cas, la résistance d'isolement ne peut être mesurée que toutes les 2 ou 3 heures.

Si le rotor d'une machine synchrone est alimenté pendant le séchage depuis son excitatrice ou d'une autre source de courant, la résistance d'isolement de tout le circuit d'excitation peut être mesurée à l'aide d'un voltmètre, sans couper le courant d'alimentation (fig. 2).

La résistance d'isolement de l'enroulement en essai peut être déterminée par la formule

$$r = r_V \left(\frac{U_1}{U_2 + U_3} - 1 \right),$$

où r est la résistance d'isolement cherchée entre l'enroulement et la terre; r_V la résistance du voltmètre; U_1 l'indication du voltmètre dans la position I; U_2 la valeur absolue de l'indication du voltmètre dans la position II; U_3 la valeur absolue de l'indication du voltmètre dans la position III.

La résistance interne du voltmètre ne doit pas être inférieure à 500 ohms par chaque volt de tension entre les

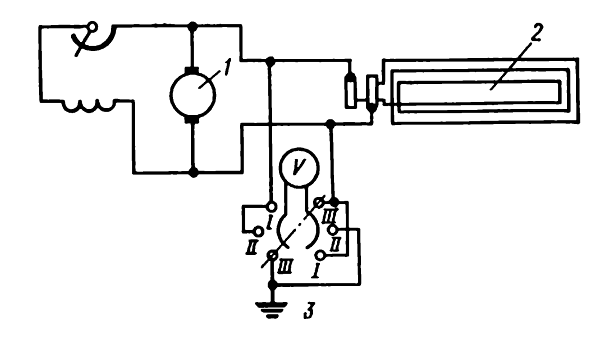


Fig. 2. Schéma pour la mesure de la résistance d'isolement de tout le circuit d'excitation à l'aide d'un voltmètre, sans débrancher la source d'alimentation:

1: excitatrice; *2*: rotor; *3*: prise de terre

bagues du rotor. A l'instant où le voltmètre est branché en série avec l'enroulement en essai (position II) son aiguille peut accuser une déviation par bond due au courant de décharge. Cette déviation temporaire ne doit pas être prise en compte: on ne doit tenir compte que des indications établies.

Si $U_2 + U_3 > U_1$ c'est l'indice que les mesures ne sont pas précises. Pour améliorer leur précision, il est désirable que l'ordre de grandeur de la résistance interne r_V du voltmètre ne soit pas trop différent de l'ordre de grandeur de la résistance d'isolement à mesurer.

En règle générale, la résistance d'isolement baisse au début du séchage au fur et à mesure de l'échauffement de la machine; mais après avoir atteint un minimum, elle commence à croître pour devenir constante ou pour varier d'une façon peu sensible dans le sens de croissance.

Après que la valeur de la résistance d'isolement s'est établie à un niveau constant et le coefficient K reste inchangé, le séchage des grosses machines doit être poursuivi pendant 5 à 10 h. Au cours de cette période, la résistance d'isolement ne doit pas varier. La valeur minimale de la résistance d'isolement pour laquelle la machine peut être couplée sur le réseau, constitue pour une température voisine de celle de fonctionnement, 1 mégohm par 1 kV de la tension nominale mais non inférieure à 0,5 mégohm. La résistance d'isolement de l'enroulement est à mesurer à chaud. Un résultat satisfaisant obtenu par la mesure après une suspense de séchage sur l'enroulement à l'état froid n'est pas une raison de considérer que le séchage est terminé.

La valeur établie de la résistance d'isolement est inscrite ainsi que la valeur du rapport r_{60}/r_{15} dans le procès-verbal. La durée totale du séchage des grosses machines est approximativement de 3 ou 4 jours et même davantage, suivant l'état de l'isolation, la température et l'humidité du milieu ambiant.

Dans le cas où une machine ne se prête pas au séchage même après son long échauffement, il est recommandé de suspendre temporairement le séchage et de refroidir les têtes des bobines, en enlevant le calorifugeage. Après avoir aéré la macine pendant 30 à 60 mn on peut reprendre son séchage.

Il est recommandé de répéter 2 ou 3 fois un tel refroidissement de l'enroulement suivi d'un séchage séparé par un intervalle de 5 à 10 h. Grâce à un refroidissement externe profond, l'humidité qui s'est accumulée à l'intérieur de l'enroulement, passera des parties internes chaudes vers la surface ce qui favorisera le séchage. Cette méthode est appliquée pour le séchage des enroulements fortement humides et il est recommandé pour améliorer son efficacité d'élever la température de l'enroulement jusqu'à 100 ou 110 °C.

Après la fin du séchage, il convient d'arrêter la machine, d'enlever les thermomètres, les appareils de mesure installés pour la durée de séchage, etc., d'examiner l'enroulement, les bagues collectrices (le collecteur) et les balais.

B. Séchage par chauffage extérieur

Pour le chauffage par cette méthode on peut utiliser les divers appareils de chauffage : les résistances, les lampes à incandescence, etc. Pour obtenir une meilleure efficacité, les sources de chauffage doivent être placées à l'intérieur de la machine. L'enroulement de la machine peut être également séché par soufflage à l'air chaud à l'aide d'une soufflante (fig. 3).

Lors du séchage par chauffage extérieur, il importe de prévenir des surchauffements locaux dus à la proximité

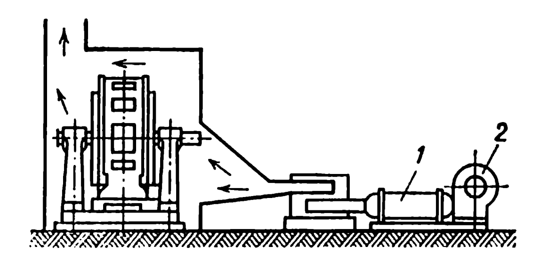


Fig. 3. Séchage d'une machine par l'air chaud :
1 : boîtier des résistances de chauffage ; 2 : ventilateur

des éléments chauffants. Ces échauffements peuvent être évités à l'aide des cloisons assurant un sens voulu au flux d'air chaud. En utilisant une soufflante, il faut veiller à ce que les étincelles produites par les éléments chauffants ne pénètrent pas à l'intérieur de la machine. Aussi, les éléments chauffants doivent-ils fonctionner sans éclats excessifs. Il est recommandé d'installer sur la tubulure de la soufflante un grillage en fil et d'imprimer à la tubulure elle-même une courbure telle que les particules portées à l'incandescence se trouvant dans l'air ne tombent pas sur l'enroulement de la machine. Il importe également de prévenir la pénétration des poussières à l'intérieur de la machine en utilisant à cet effet un filtre en tissu sur la tubulure d'aspiration du ventilateur.

Une température plus basse des couches intérieures de l'enroulement par rapport à ses couches externes et l'absence de surchauffages locaux à l'intérieur de l'enroulement permettent d'utiliser lors du chauffage extérieur une température d'échauffement plus élevée de l'enroulement que lors

du chauffage par d'autres procédés. Toutefois, cette température, mesurée au thermomètre, ne doit pas excéder 90 °C.

Le séchage par chauffage extérieur peut être utilisé soit de façon indépendante soit en combinaison avec d'autres méthodes qui seront considérées plus loin. Le séchage des grosses machines par leur chauffage extérieur à l'aide des soufflantes est peu efficace à cause des difficultés que présente le chauffage du fer actif.

C. Séchage par courant électrique depuis des sources extérieures

Cette méthode permet de sécher les machines électriques de tous les types. Elle est utilisée principalement dans le cas où il est impossible d'assurer la rotation de la machine et l'on dispose d'une source à basse tension mais d'intensité du courant élevée. Etant donné que la machine à sécher par cette méthode est immobile, les conditions de refroidissement sont moins bonnes que dans une machine tournante. C'est la raison pour laquelle le courant nécessaire au séchage est généralement considérablement inférieur à sa valeur nominale et constitue pour les machines ouvertes, par exemple, seulement 50 à 70 % du courant nominal.

Pour éviter un claquage de l'isolation, il n'est pas recommandé de couper le courant avec un interrupteur ou un disjoncteur, il convient de le réduire progressivement en abaissant la tension appliquée.

1. Séchage des machines à courant continu. Pour le séchage par cette méthode, le courant continu fourni par une source à basse tension est envoyé dans le circuit série de la machine comportant l'enroulement d'induit, l'enroulement des pôles auxiliaires, l'enroulement série et l'enroulement de compensation. La valeur nécessaire de la tension est déterminée à partir de la résistance ohmique de tout le circuit et de l'intensité du courant nécessaire au séchage. Pendant le séchage, on assure périodiquement une rotation lente de l'induit pour que toutes les lames du collecteur et toutes les bobines soient mises en circuit à tour de rôle.

L'enroulement d'excitation en dérivation peut être séché séparément si son séchage ensemble avec les enroulements série s'avère insuffisant. Etant donné qu'en cas d'un faible décalage des balais, par rapport à la ligne neutre, la machine peut démarrer et atteindre une vitesse dangereuse, il est

nécessaire, pendant le séchage, de la surveiller en permanence et de couper au besoin le courant par une diminution progressive de la tension appliquée. L'inconvénient de cette méthode de séchage est le grillage des lames du collecteur dû à l'état immobile de l'induit.

2. Séchage des moteurs asynchrones. Pour sécher par courant électrique un moteur asynchrone triphasé il est nécessaire de caler son rotor et d'alimenter le stator depuis une source à courant triphasé d'une tension non supérieure à 15 ou 20 % de la tension nominale de la machine : l'enroulement du rotor doit être mis en court-circuit. Dans ces conditions, l'intensité du courant, aussi bien dans le stator que dans le rotor mis en court-circuit, atteint des valeurs sensiblement égales aux valeurs nominales. Si la tension nécessaire à l'alimentation du stator n'est pas disponible, on peut faire passer le courant dans le rotor, en court-circuitant le stator. Dans ce cas, on applique au rotor une tension non supérieure à 15—21 % de la tension nominale sur les bagues. Si la température s'élève trop vite, il convient de réduire la valeur de la tension appliquée. Dans le cas où la tension ne peut pas être réglée, il convient d'interrompre périodiquement le courant.

Le rotor et le stator peuvent être séchés séparément. A cet effet, le rotor doit être sorti du stator. Pour obtenir le courant nominal, il faut appliquer à peu près la même tension que dans le cas d'alimentation du stator avec le rotor mis en court-circuit.

En séchant les moteurs asynchrones par la méthode de court-circuit, il est nécessaire de surveiller l'échauffement des frettes du rotor. Si la température des frettes devient supérieure à 95 °C, il faut diminuer l'intensité du courant ou l'interrompre périodiquement. Pour le séchage par cette méthode des moteurs à double cage il convient de sortir le rotor afin d'éviter un échauffement préjudiciable possible de l'enroulement de démarrage.

Pour le séchage par courant continu, la machine doit être immobilisée. Dans le cas où l'enroulement statorique possède six bornes, toutes les phases sont couplées en série (fig. 4, *a* et *b*) et alimentées en courant continu. Dans le cas où la déconnexion des phases est impossible, le séchage est effectué d'après les schémas de la fig. 4, *c* ou *d* indiqués pour le couplage des enroulements en étoile et en triangle. Dans ces conditions pour assurer un échauffement uniforme des

enroulements il est nécessaire de commuter périodiquement les phases. Cette commutation est à effectuer chaque 2 à 4 h suivant la taille de la machine et la vitesse de croissance de la température au début du séchage. La température de l'enroulement lors du séchage par cette méthode doit être mesurée dans toutes les phases.

La valeur de la tension nécessaire est déterminée d'après la résistance ohmique de l'enroulement et l'intensité du courant exigée. Le schéma de l'alimentation doit prévoir la possibilité de réglage du courant et un fonctionnement de longue durée.

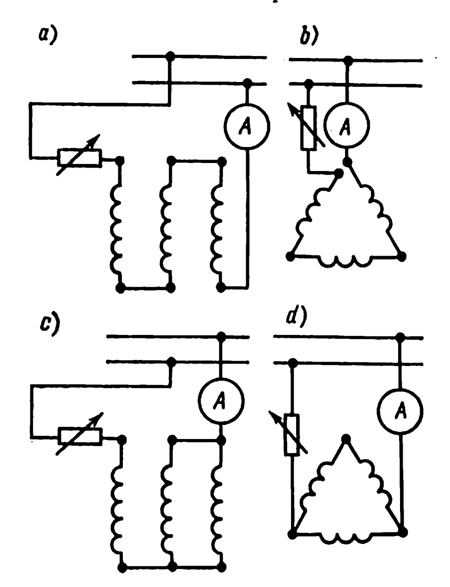


Fig. 4. Schémas pour le séchage d'un moteur asynchrone par un courant continu: *a* et *b*: en présence de six bornes de l'enroulement; *c* et *d*: en présence de trois bornes de l'enroulement

Lors du séchage par courant de l'enroulement statorique, l'enroulement rotorique sèche généralement de façon satisfaisante et n'exige donc pas de séchage séparé. Au cas contraire, le rotor peut être séché séparément, de même que le stator. Les schémas de la fig. 4 peuvent être également appliqués pour le séchage par courant monophasé, en court-circuitant le rotor bobiné. En utilisant un courant monophasé, pour le séchage des moteurs à double cage d'après les schémas de la fig. 4*a*, *c* et *d*, on doit retirer le rotor et cela pour des raisons exposées plus haut. C'est seulement lors du séchage suivant le schéma de la fig. 4, *b*

(triangle ouvert) que le rotor peut être laissé à l'intérieur du stator.

3. Séchage des machines synchrones. Les machines synchrones peuvent être séchées aussi bien par le courant continu que par le courant alternatif. Le séchage par courant alternatif se fait de la même manière que celui des moteurs asynchrones.

Pour le séchage par courant triphasé le rotor doit être sorti, étant donné que dans le cas d'un turbo-alternateur le champ tournant du stator provoque un échauffement inadmissible, par pertes dans les circuits rotoriques, de l'enroulement de démarrage et de la surface du tambour de rotor. La valeur de la tension à appliquer dépend de la réactance de dissipation, le rotor étant retiré, et pour un courant de séchage de 0,5 à 0,7 de la valeur nominale, elle est généralement comprise entre 0,08 et 0,20 de sa valeur nominale.

Pour éviter un échauffement exagéré des circuits rotoriques, le séchage peut être assuré par un courant monophasé, les enroulements devant être couplés d'après le schéma du triangle ouvert (fig. 4, *b*). C'est seulement ce couplage des enroulements qui assure l'absence de liaison inductive avec les circuits rotoriques (les enroulements ne seront parcourus dans ce cas que par le courant de succession nulle). La tension nécessaire au séchage par courant monophasé se trouve comprise à peu près dans les mêmes limites que lors du séchage par courant triphasé. Le séchage par courant (par pertes dans l'enroulement) des grosses machines est très difficile à réaliser parce qu'il exige de mettre en œuvre un courant d'intensité élevée sous des tensions non normalisées ; c'est pourquoi, cette méthode n'est pratiquement pas employée pour le séchage des grosses machines.

D. Séchage par courant de court-circuit des machines fonctionnant en générateur

1. Séchage d'une génératrice à courant continu. Cette méthode de séchage ne peut être appliquée que dans les cas où la machine considérée peut fonctionner en générateur. Le circuit d'induit de la machine (voir fig. 5) doit être mis en court-circuit à travers un disjoncteur et un ampèremètre. Si la machine comporte un enroulement d'excitation en série, il doit être branché à flux soustractif avec l'enroule-

ment dérivation, c'est-à-dire pour l'affaiblissement du flux principal alors que l'enroulement dérivation est alimenté à travers un rhéostat de forte résistance depuis une source indépendante. L'alimentation de l'enroulement d'excitation n'exige qu'une faible intensité de courant.

En assurant le séchage par courant de court-circuit, on doit obligatoirement tenir compte des particularités de fonctionnement de la génératrice en ce régime qui se manifestent par l'auto-accrochage de la machine sous l'effet des pôles auxiliaires renforçant l'aimantation des pôles principaux.

Lorsque la machine fonctionne en génératrice, les sections court-circuitées en commutation, se trouvant dans la zone

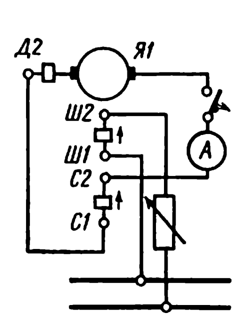


Fig. 5. Schéma pour le séchage d'une génératrice à courant continu en régime de court-circuit

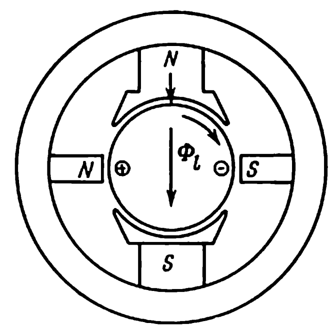


Fig. 6. Flux longitudinal de magnétisation dû au courant dans les sections en commutation de l'enroulement d'induit lors du fonctionnement de la machine en génératrice

neutre, deviennent le siège d'un flux magnétique longitudinal Φ_l qui se développe sous l'effet du champ des pôles auxiliaires (assurant généralement une commutation accélérée) et agit dans le même sens que le champ résiduel des pôles principaux ce qui renforce le flux produit par ces derniers (fig. 6).

Si l'enroulement série est monté à flux additif avec l'enroulement dérivation, le processus d'augmentation du flux des pôles principaux se développe de façon accélérée et amène l'apparition d'un courant excessif extrêmement dangereux ce qui provoque, comme le montre l'expérience, de grosses avaries de la machine et les accidents du person-

nel. Pour empêcher de tels phénomènes de se produire, l'enroulement série doit être monté à flux soustractif, c'est-à-dire pour l'affaiblissement du flux des pôles principaux. Si l'enroulement série n'est pas utilisé, la couronne porte-balais doit être légèrement décalée dans le sens de rotation de la machine (ordinairement de 1 ou 2 lames du collecteur) pour que la composante longitudinale de la réaction de l'induit soit supérieure à l'effet magnétisant des pôles auxiliaires.

Avant de décaler la couronne porte-balais, il est nécessaire de s'assurer qu'elle se trouve réellement sur la ligne neutre et de prendre en considération le fait que les machines à pôles auxiliaires sont très sensibles au décalage des balais.

Si le décalage de la couronne porte-balais par rapport à la ligne neutre amène un crachement inadmissible au collecteur on peut, à titre temporaire, placer sur les pôles principaux un enroulement d'excitation série à raison d'une spire par pôle ; dans les grosses machines, on peut se borner à l'emploi d'un nombre de spires deux fois plus petit.

En séchant les machines à courant continu par courant de court-circuit, on doit toujours avoir en vue la possibilité d'une brusque croissance du courant dans le circuit d'induit pouvant présenter un danger tant pour la machine que pour le personnel. Avant de procéder au séchage, il est nécessaire de s'assurer que le décalage de la couronne porte-balais est suffisant et que le couplage de l'enroulement d'excitation série assurant la démagnétisation est correct, sans se limiter à la vérification de sa polarité. A cet effet, on procède à une mise en marche d'essai de la machine pour le fonctionnement en court-circuit, en réglant le disjoncteur à une intensité de courant réduite pour que la machine soit immédiatement débranchée en cas d'une brusque croissance de courant. En effectuant cette vérification, on ne doit pas oublier que la coupure d'une forte intensité de courant à la main, à l'aide d'un interrupteur, peut présenter un danger pour l'opérateur.

Ce n'est qu'après s'être assuré pratiquement que le courant d'induit se prête à une bonne régulation continue par variation de la résistance du rhéostat placé dans le circuit de l'enroulement d'excitation dérivation, et que le dispositif de protection est en bon état de marche, qu'on peut procéder au séchage de la machine.

Des considérations qui viennent d'être exposées il résulte qu'en marche de la machine il ne faut pas déplacer la cou-

ronne porte-balais en vue de régler l'intensité du courant ou de supprimer les étincelles anormales.

Pour mesurer la température de l'induit et du collecteur, il convient d'arrêter la machine. D'autre part, il importe d'éviter des mises en marche et des arrêts trop fréquents. C'est pourquoi les mesures sont faites plus rarement que dans le cas du séchage des enroulements immobiles. Dans la plupart des cas, l'enroulement dérivation n'est pas soumis à un séchage distinct étant donné que son séchage est généralement assuré par la chaleur dégagée par l'induit.

2. Séchage des alternateurs. Pour le séchage des alternateurs, par courant de court-circuit, toutes les trois phases du stator doivent être mises en court-circuit (fig. 7). Cette

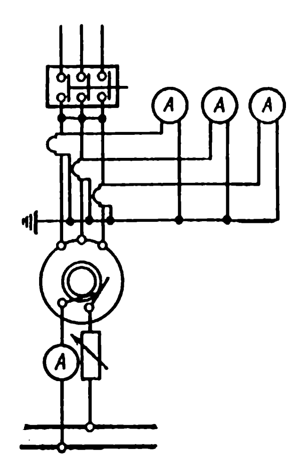


Fig. 7. Schéma pour le séchage d'un alternateur en régime de court-circuit

mise en court-circuit doit être faite à l'amont du disjoncteur à huile parce qu'en cas d'un déclenchement inopiné de celui-ci la haute tension entre les bornes de la machine excitée pourra provoquer un claquage de l'isolation de l'enroulement humide. Si la mise en court-circuit ne peut pas être assurée à l'amont du disjoncteur, le circuit de sa bobine de déclenchement doit être interrompu et l'appareil lui-même doit être verrouillé en vue d'empêcher son ouverture. La mise en court-circuit doit être assurée avec soin et les courants dans toutes les phases doivent être identiques. Si les courants de phase ne sont pas égaux, ou l'une des phases n'est pas fermée, les circuits rotoriques peuvent subir un échauffement considérable (par le champ de succession inverse). Aussi,

pour pouvoir contrôler l'intensité du courant, est-il impératif de prévoir trois ampèremètres.

L'alternateur à sécher est mis en marche et quand sa vitesse de rotation prend sa valeur normale, on injecte dans l'enroulement d'excitation un courant soit depuis sa propre excitatrice soit depuis une source auxiliaire.

Le séchage peut se faire également à une vitesse de rotation réduite. Mais on ne devra pas oublier que l'excitatrice ne peut s'accrocher qu'à une vitesse de rotation bien déterminée (non inférieure à 2/3 de la valeur nominale).

Pour obtenir la température d'échauffement nécessaire il est recommandé, pour les machines à ventilation par refoulement, de réduire le débit d'air froid en fermant les registres ou en réglant le by-pass de l'air chaud dans les chambres d'air froid. Dans les machines à ventilation en circuit fermé, lorsque l'air est refroidi par des réfrigérants spéciaux, il convient, au début de séchage, d'arrêter l'arrivée d'eau dans le réfrigérant d'air tant que l'air ne soit chauffé jusqu'à une température de 60 à 65 °C. La température est maintenue à ce niveau, en réglant le débit d'eau admise dans le réfrigérant.

Le séchage des grosses machines, par exemple, des turbo-alternateurs à l'aide de cette méthode est peu économique.

E. Séchage par pertes de ventilation

Cette méthode de séchage peut être appliquée à des machines rapides, par exemple, aux turbo-alternateurs, dans lesquels les pertes par ventilation sont suffisantes pour obtenir la température nécessaire. Le séchage s'effectue à la vitesse de rotation nominale; le circuit de l'enroulement d'excitation doit être ouvert. Il suffit à cet effet d'enlever les balais à une seule bague collectrice du rotor. Par souci de sécurité, l'enroulement du stator est mis en court-circuit. Dans les machines à système de refroidissement en circuit fermé l'arrivée d'eau dans le réfrigérant d'air est arrêtée alors que dans les machines à ventilation en circuit ouvert, l'arrivée et la sortie d'air vers l'extérieur sont fermées en constituant un cycle de ventilation fermé par by-pass de l'air depuis la chambre d'air chaud vers la chambre d'air froid.

Avec cette méthode de séchage il est aussi nécessaire d'ouvrir périodiquement, pour 5 à 10 minutes, les trappes

dans les flasques de l'alternateur pour évacuer les vapeurs d'eau. Le réglage de la température d'air se fait suivant le système de ventilation de la même manière que lors du séchage par la méthode de court-circuit (voir annexe 10, D).

Le séchage par pertes de ventilation assure une température d'échauffement uniforme mais il est peu économique de même que le séchage par le courant de court-circuit et pour cette raison, n'est employé pour les grosses machines que relativement peu.

F. Séchage des moteurs à courant continu en marche à « vitesse rampante »

Cette méthode de séchage par fonctionnement à une vitesse très basse dite vitesse de marche « rampante » (de l'ordre de 1 à 2 % de la vitesse nominale) peut être appliquée aux machines multipolaires dont les enroulements d'induit

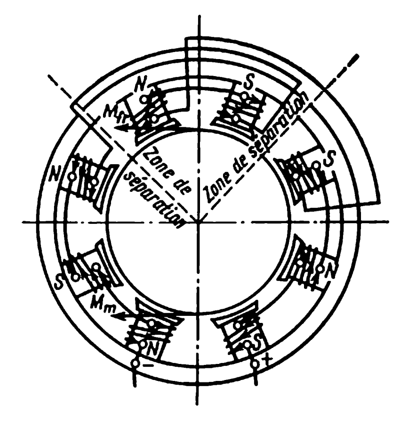


Fig. 8. Schéma de branchement de l'enroulement d'excitation d'une machine à courant continu pour le séchage à vitesse « rampante »

sont du type imbriqué. Dans la pratique, cette méthode est utilisée pour les moteurs de laminoirs à basse vitesse.

La vitesse « rampante » peut être obtenue si l'on inverse le flux dans une partie de pôles par une commutation correspondante de leurs extrémités (fig. 8) et l'on alimente l'induit avec un courant de tension réduite.

Avec un tel schéma de branchement, la partie de pôles qui interagit avec le courant d'induit, développe un couple moteur M_m alors que l'autre partie de pôles produit un couple de freinage M_{fr}.

Ces deux couples donnent le couple résultant du moteur. Au cours de la mise en vitesse du moteur, l'égalité de son couple résultant au couple résistant a lieu pour une vitesse réduite à laquelle le moteur commence à fonctionner d'une façon stable [24].

La différence entre le nombre de pôles moteurs et celui de pôles de freinage détermine, pour un flux et un courant d'induit donnés, le couple de démarrage du moteur.

Le courant de séchage d'un induit tournant peut être pris égal au courant d'induit immobile, lorsque l'intensité du courant est déterminée par la résistance du circuit d'induit et la valeur de la tension appliquée.

L'expérience de séchage des machines à l'aide du schéma considéré montre que dans la plupart des cas il est suffisant d'inverser le sens du courant dans environ 30 % des pôles.

La différence entre le nombre de pôles moteurs et celui de pôles de freinage peut être calculée au moyen de la formule

$$p_m - p_{fr} = \frac{2p \cdot M_d^\circ}{\Phi^\circ I^\circ},$$

où p_m et p_{fr} sont respectivement le nombre de pôles moteurs et de pôles de freinage; $2p$ est le nombre total de pôles de la machine; M_d° le couple de démarrage de moteur; Φ°, I° le flux d'un pôle et le courant d'induit en unités relatives.

Le couple à vide d'un moteur (sans entraînement d'un mécanisme d'utilisation) constitue généralement 1,5 à 2 % du couple nominal alors que le courant de séchage est compris entre 50 et 60 % du courant nominal. Etant donné qu'à l'instant de décollage le couple est supérieur à celui de marche en vide, on se donne un couple de démarrage de l'ordre de 3 à 4 % du couple nominal.

Le flux d'un pôle peut être pris égal à 40 ou 60 % du flux nominal. Le courant d'excitation peut être déterminé, pour un flux donné, d'après la caractéristique d'aimantation de la machine considérée en admettant que le flux est proportionnel à la f.é.m. et, si une telle caractéristique manque, d'après la caractéristique d'aimantation universelle (fig. 9) ou enfin, vu la précision exigée, le courant d'excitation peut être approximativement pris égal à 30 à 50 % du courant nominal, pour un flux de 40 à 60 % de sa valeur nominale.

Pour assurer les conditions les plus favorables de fonctionnement du moteur, du point de vue des forces mécaniques qui s'exercent sur l'induit, il est recommandé de disposer les pôles moteurs et les pôles de freinage de manière que leur axe de symétrie se trouve sur le diamètre horizontal.

Exemple d'application. Déterminons les paramètres du séchage d'un moteur à courant continu servant à la commande d'un laminoir.

Les caractéristiques du moteur : la puissance $P = 2580$ kW ; le courant $I = 470$ A ; la tension $U = 600$ V ;

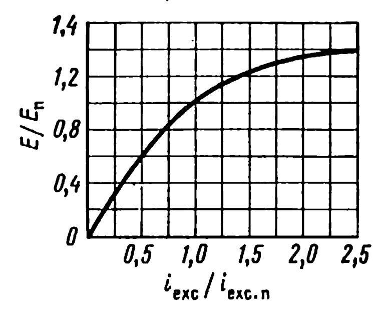


Fig. 9. Caractéristique universelle d'aimantation des machines électriques

la vitesse de rotation $n = 70/160$ tr/mn ; le nombre de pôles $2p = 16$; le courant d'excitation $i_n = 200$ A.

La résistance totale du circuit série de l'induit, y compris les barres :

$$r_{ind} = 0{,}015 \text{ ohm}.$$

Posons $M_d^\circ = 0{,}04$; $I^\circ = 0{,}50$; le flux par pôle $\Phi^\circ = 0{,}40$.

La différence entre le nombre de pôles moteurs et celui de pôles de freinage :

$$p_m - p_{fr} = \frac{2pM_d^\circ}{\Phi^\circ I^\circ} = \frac{16 \cdot 0{,}04}{0{,}40 \cdot 0{,}50} = 3{,}2.$$

En arrondissant, prenons $p_m = 10$, $p_{fr} = 6$.

D'après la caractéristique d'aimantation universelle (fig. 9), nous obtenons le courant d'excitation i pour $\Phi^\circ = 0{,}4$:

$$0{,}33 i_n = 0{,}33 \cdot 200 = 66 \text{ A}.$$

La tension aux bornes de la génératrice alimentant le moteur :

$$U_g = I r_{ind} = 0{,}5 \cdot 4700 \cdot 0{,}015 \approx 35 \text{ V}.$$

Lors du séchage du moteur, il est nécessaire de protéger le circuit d'excitation contre une rupture, étant donné qu'en cas d'un tel défaut le moteur risque de s'emballer: son circuit d'excitation ne doit pas comporter de coupe-circuit à fusible. Pour éviter le grillage des lames du collecteur, il faut veiller à ce que le moteur ne s'arrête pas par suite d'une baisse de tension appliquée à l'induit ou d'une croissance brusque du couple résistant. En outre, lors du séchage par la méthode considérée (de même que lors du séchage par d'autres méthodes), il est nécessaire de surveiller la température aux joints de tous les enroulements série de la machine étant donné que des contacts qui ne sont pas suffisamment francs peuvent provoquer un échauffement excessif et une détérioration des connexions.

La méthode de séchage des gros moteurs de laminoir pendant leur marche à vitesse rampante s'avère bien efficace parce que la vitesse du moteur est assez stable et tous les enroulements de la machine sèchent simultanément alors que la rotation de l'induit prévient le grillage des lames du collecteur et on a la possibilité de vérifier tous les contacts dans les barres et toutes les soudures dans les enroulements série de la machine. En outre, le séchage du moteur peut se faire simultanément avec le séchage des génératrices du groupe de conversion qui fournit au moteur le courant de séchage, ce qui permet d'économiser sur le temps et de réduire les délais de mise en service des machines.

G. Séchage par pertes dans le fer actif du stator

Le chauffage de la machine est obtenu dans ce cas grâce à la production, dans le fer actif statorique des machines à courant alternatif, d'un flux magnétique à l'aide d'un enroulement de magnétisation spécial appliqué sur le stator et alimenté en courant monophasé (fig. 10). Cet enroulement enveloppe également la carcasse de la machine, mais par suite d'une différence considérable entre les perméabilités de la carcasse et du fer actif, le flux dérivé vers la carcasse sera peu considérable.

Le séchage des machines à grand entrefer, par exemple, des turbo-alternateurs, peut être assuré avec le rotor sorti ou rentré. Dans le premier cas, le rotor peut être séché séparément. Le séchage des machines à petit entrefer, par exemple, des moteurs asynchrones, se fait avec le rotor

retiré, étant donné que le petit entrefer ne permet pas de placer l'enroulement de magnétisation. Le séchage des moteurs asynchrones peut se faire également avec le rotor rentré, si le croisillon de leur rotor présente des trous permettant de poser l'enroulement de magnétisation enveloppant à la fois le fer du stator et le fer du rotor. Avec une telle méthode de séchage, il est nécessaire de surveiller l'échauffement des frettages et de ne pas admettre que leur température soit supérieure à 95 °C.

Lorsque le séchage se fait avec le rotor rentré, ce dernier doit être isolé du socle pour éviter la formation d'un circuit en court-circuit (arbre — paliers — socle) qui peut être

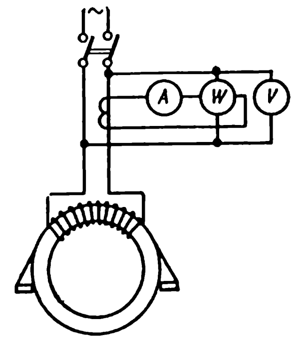


Fig. 10. Schéma de branchement d'un enroulement de magnétisation pour le séchage des stators de machines à courant alternatif

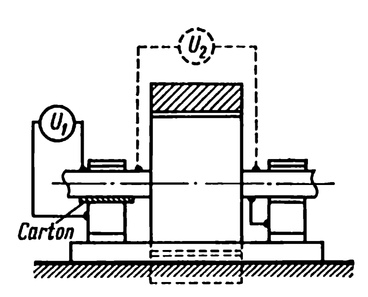


Fig. 11. Isolation de l'arbre du rotor pour le séchage de la machine

traversé par des courants excessifs. Pour isoler l'arbre du rotor, on interpose du carton isolant sous l'un des tourillons de l'arbre (fig. 11). L'isolation de l'arbre peut être également assurée par l'isolation du palier prévue dans certaines machines pour empêcher la circulation des courants dans les paliers.

Au cours du séchage il est nécessaire de contrôler l'état de l'isolation de l'arbre. A cet effet, on mesure la valeur de la tension entre l'arbre et le palier (fig. 11) comportant l'isolation; lors de ces mesures, le film d'huile du deuxième palier doit être shunté. Lorsque l'isolation est bonne, la tension U_1 doit être approximativement égale à la tension U_2 aux extrémités de l'arbre.

La résistance d'isolement de l'enroulement statorique peut être mesurée lorsque l'enroulement de magnétisation est mis en circuit, parce que le flux pulsatoire qui traverse le fer actif n'embrasse pas les spires de l'enroulement statorique et ce dernier n'est le siège d'aucune f.é.m. induite.

Quant à la mesure de la résistance d'isolement de l'enroulement rotorique d'une machine synchrone, il n'est pas recommandé de le faire lorsque l'enroulement de magnétisation placé sur le stator est mis sous tension quelle que soit la disposition des bagues collectrices sur l'arbre (d'un seul ou des deux côtés du rotor). Cela tient à ce que dans le cas d'un rotor mis à la terre, la mesure de la résistance d'isolement entre l'enroulement rotorique et la masse de la machine effectuée à l'aide d'un mégohmmètre, introduit dans le circuit de mesure une force électromotrice égale à la f.é.m. produite par une spire de l'enroulement de magnétisation.

Avant de procéder au séchage par pertes dans le fer actif, il est obligatoire de prendre toutes les mesures de sécurité. L'alésage du stator ne doit contenir aucun objet métallique pouvant provoquer un court-circuit entre les tôles du fer actif ou une détérioration du fer. Lors des mesures de la température à l'aide de thermocouples, il est inadmissible de court-circuiter au cours des commutations les extrémités de deux thermocouples; sinon un circuit peut se former, dans lequel sera induite une f.é.m. égale à la f.é.m. d'une spire de l'enroulement de magnétisation.

Dans le cas où la méthode considérée est appliquée au séchage d'un turbo-alternateur avec rotor rentré, il est nécessaire de tourner périodiquement le rotor (à l'aide du dispositif de rotation d'arbre). L'instant de fin de séchage est déterminé par celui du séchage de l'isolation de l'enroulement statorique; au besoin, l'enroulement rotorique est soumis à un séchage complémentaire en charge de la machine.

Le nombre de spires de l'enroulement de magnétisation est déterminé par la formule:

$$W = \frac{45U}{QB},$$

où U est la tension aux extrémités de l'enroulement de magnétisation, en V; Q la section du fer actif, en cm^2; B la valeur de l'induction magnétique, en T;

$$Q = kl_t h_t = k\,(l - nb)\,h_t \quad \text{(voir fig. 12)},$$

où k est un coefficient de remplissage du fer, pris égal à 0,95 pour les tôles vernies et à 0,9 pour les tôles isolées au papier; l_f la longueur du fer actif du stator sans canaux de ventilation, en cm; h_f la hauteur du fer actif (sans couche de dents), en cm; l la longueur totale du fer actif, en cm; b la largeur d'un canal de ventilation, en cm; n le nombre de canaux.

La valeur de l'induction B est généralement prise dans les limites de 0,6 à 0,8 T. Pour déterminer l'intensité du courant, il est nécessaire de calculer la force magnétomotrice exigée:

$$F = \pi D_{moy} \text{ (A/cm)},$$

où D_{moy} est le diamètre moyen du fer actif du stator, en cm; A/cm l'intensité du champ magnétique (par 1 cm de longueur du circuit magnétique) dépendant de la qualité du fer

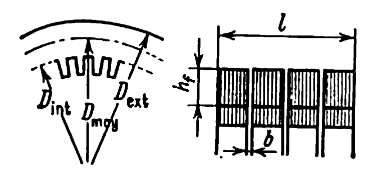


Fig. 12. Fer actif statorique

actif. Pour les aciers faiblement et moyennement alliés on peut prendre approximativement pour $B = 0{,}6$; 0,7 et 0,8 T l'induction A/cm respectivement égale à 1,4; 1,8, et 2,2 et pour les aciers de dynamo respectivement 2,2; 2,8; 3,7.

L'intensité du courant est donnée par la formule

$$I = \frac{F}{W}.$$

Pour l'exécution des enroulements de magnétisation on utilise le fil de marque ПР ou ПРГ; l'emploi d'un câble sous plomb ou d'un câble armé est inadmissible. La charge de courant du fil ne doit pas dépasser 60 à 70 % de la charge admissible pour la pose normale des fils, ce qui est imposé par une température considérable de l'air dans l'entrefer. L'enroulement de magnétisation doit être isolé du fer actif par des feuilles d'amiante, de carton, etc.

Pour le réglage de la température du fer actif, il convient d'agir sur la valeur de l'induction. A cet effet, il est nécessaire de faire varier soit la tension appliquée aux extrémités de l'enroulement soit le nombre de spires de

celui-ci. Dans ce dernier cas, il faut avoir en vue que pour une tension inchangée l'augmentation du nombre de spires fait réduire l'induction dans le fer et, par conséquent, les pertes dans le fer alors que la diminution du nombre de spires fait croître ces pertes. Au début de séchage, pour assurer une croissance rapide de la température, il est recommandé d'augmenter l'induction. Pour assurer un séchage plus efficace de l'enroulement statorique, il est recommandé

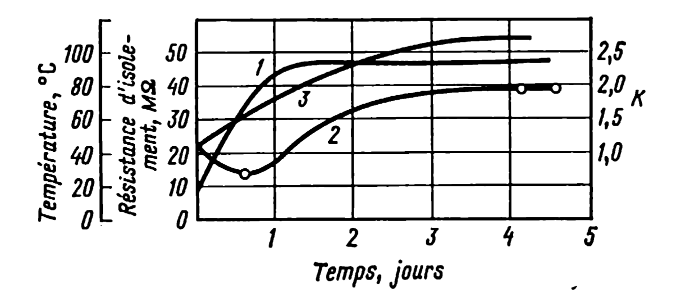


Fig. 13. Courbes de séchage d'un alternateur par la méthode des pertes dans le fer actif:

1: température de l'enroulement statorique; *2*: résistance d'isolement; *3*: coefficient *K*

de prévoir un calorifugeage des têtes des bobines, en appliquant les feuilles d'amiante ou en plaçant une grosse toile, et de prévenir la possibilité d'aspiration de l'air froid à l'intérieur de la machine.

Les courbes typiques de variation de la température de l'enroulement statorique, de la résistance d'isolement de cet enroulement et du coefficient d'absorption (du rapport r_{60}/r_{15}, voir l'annexe 10, A) au cours du séchage d'un turboalternateur sont représentées sur la fig. 13 [10]. Il convient de signaler que lorsque l'enroulement est sec, le coefficient d'absorption diminue avec l'augmentation de la température.

Exemple d'application. On demande de calculer l'enroulement de magnétisation pour le séchage du stator d'un moteur asynchrone dont les dimensions du fer actif sont les suivantes: $D_{ext} = 250$ cm; $D_{int} = 197$ cm; la longueur totale du fer actif $l = 95$ cm; le nombre de canaux de ventilation: 15; la largeur d'un canal de ventilation: 1 cm.

Pour déterminer le nombre de spires de l'enroulement de magnétisation il faut calculer la section du fer actif:

$$Q=0,95\,(l-nb)\,h_t=0,95\,(l-nb)\,\frac{D_{ext}-D_{int}}{2}=$$

$$=0,95\cdot(95-15\cdot1)\cdot\frac{250-197}{2}=2014\ \text{cm}^2.$$

Prenons $B = 0,6$ T (compte tenu du fait que l'induction peut être augmentée par enlèvement de spires) et la tension $U = 380$ V. Dès lors

$$W=\frac{45U}{QB}=\frac{45\cdot380}{2014\cdot0,6}=14\ \text{spires}.$$

La force magnétomotrice nécessaire est:

$$F=\pi D_{moy}\,(\text{A/cm})=\pi\,\frac{D_{ext}+D_{int}}{2}\,(\text{A/cm})=$$

$$=3,14\cdot\frac{250+197}{2}\cdot1,4\approx980\ \text{A}.$$

L'intensité du courant:

$$I=\frac{F}{W}=\frac{980}{14}=70\ \text{A}.$$

Pour réaliser cet enroulement, prenons le fil de marque ПР de 35 mm² de section et posons sur le stator 14 spires régulièrement espacées.

L'arbre du rotor peut être utilisé comme une spire de l'enroulement de magnétisation. A cet effet, on installe aux extrémités de l'arbre du rotor des colliers spéciaux qui embrassent l'arbre et reçoivent des fils d'alimentation. Le courant nécessaire au séchage est déterminé par les formules données plus haut dans lesquelles le nombre de spires est pris égal à l'unité.

Pour le séchage avec une seule spire, il est nécessaire de disposer d'une basse tension qui peut être obtenue soit à partir d'un transformateur de soudage, soit à l'aide d'un transformateur ordinaire de 6000/230 V ou 6000/400 V, en branchant son enroulement haute tension sur le réseau de 220 ou 380 V. Dans cette méthode, il est également nécessaire d'assurer l'isolement de l'une des extrémités de l'arbre; en outre, pour empêcher un court-circuit possible, il faut que la source d'alimentation ne soit pas mise à la terre.

Lors du séchage par la méthode des pertes dans le fer actif des stators des grosses machines rapides comportant des têtes des bobines développées de l'enroulement statorique (par exemple, des turbo-alternateurs) il peut s'avérer que la température de l'enroulement se trouve insuffisante. Dans de tels cas, il est raisonnable d'avoir recours à une méthode combinée, en chauffant les têtes des bobines par l'air chaud provenant d'une soufflante. On peut également chauffer les enroulements statoriques par courant continu ou par courant monophasé, mais seulement lorsque l'enroulement du stator est monté en triangle ouvert.

Il est déconseillé d'effectuer un séchage simultané du stator par pertes dans le fer actif et du rotor par courant continu, étant donné que la saturation du fer statorique fait croître fortement le courant magnétisant.

Pour conclure, signalons que la méthode de séchage par pertes dans le fer actif est applicable non seulement pour le séchage des machines à courant alternatif, mais également pour celui des induits des machines à courant continu. C'est ainsi, par exemple, que cette méthode a été utilisée pour le séchage de l'induit d'un moteur électrique de 5150 kW, 50 tr/mn, à l'aide de deux transformateurs de soudage de 50 et 397 ampères chacun, mis en parallèle. Cette méthode s'avère bien efficace (surtout pour les grosses machines) parce qu'elle permet d'assurer le séchage de la machine à l'arrêt avant la fin du montage de toute l'installation dans son ensemble, ce qui permet de réduire considérablement les délais de mise en service des équipements. En outre, le séchage par cette méthode réduit considérablement la consommation d'énergie. Par contre, la méthode est peu efficace en cas de séchage de petites machines étant donné que le nombre de spires de l'enroulement de magnétisation devient dans ce cas très grand.

H. Séchage par pertes dans la carcasse du stator

Dans cette méthode de séchage, l'échauffement de la machine est obtenu grâce aux pertes dans la carcasse du stator produites par l'enroulement de magnétisation bobiné sur la carcasse et alimenté en courant monophasé. Le séchage par cette méthode des machines de grandes dimensions exige d'enrouler un grand nombre de spires et d'utiliser

une source d'alimentation de forte puissance et, pour ces raisons, elle n'est pas appliquée.

Le schéma de branchement de l'enroulement de magnétisation est représenté par la fig. 14. Les sources d'alimentation les plus commodes sont constituées par les transformateurs de soudage qui fournissent une basse tension et permettent le réglage de l'intensité du courant.

En cas de séchage simultané de plusieurs machines, on peut utiliser une tension plus élevée que celle obtenue aux

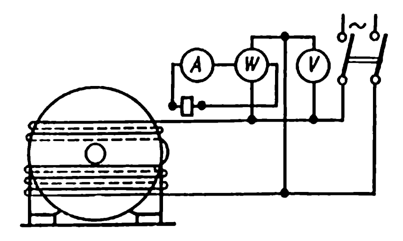


Fig. 14. Schéma de branchement de l'enroulement de magnétisation pour le séchage par pertes dans la carcasse du stator

bornes des transformateurs de soudage, par exemple, la tension de 220 V, en montant en série les enroulements de magnétisation de toutes les machines à sécher. L'enroulement de magnétisation est placé au-dessus de la carcasse calorifugée au moyen des feuilles d'amiante; il peut être placé soit horizontalement, soit verticalement. En cas de sa disposition horizontale, il est recommandé, pour obtenir un chauffage plus uniforme, de placer une plus grande partie de spires dans la partie inférieure de la carcasse. Si la carcasse comporte des trous, l'enroulement de magnétisation peut

Tableau 1

Caractéristiques de la machine électrique			Caractéristiques de l'enroulement de magnétisation		
Tension, V	Puissance, kW	Vitesse de rotation, tr/mn	Tension, V	Nombre de spires	Intensité, A
500	40	960	25	8	120
6000	260	730	65	2×15	2×34
6000	500	1000	65	16	90
6000	1400	990	220	12	118
6000	1565	3000	25	6	200
6000	2500	1000	65	26	140

passer à travers ces trous-ci. Le réglage de. a température d'échauffement est obtenu par une coupure périodique du courant. Le calcul de l'enroulement de magnétisation peut être effectué d'après la même méthode que lors du séchage des transformateurs par pertes dans le corps (voir annexe 11). Pourtant, le nombre de spires de l'enroulement peut être déterminé aussi par voie expérimentale.

Le tableau 1 ci-dessus rassemble, à titre d'exemple, les caractéristiques des enroulements de magnétisation utilisées pour le séchage de certaines machines.

ANNEXE 11

Séchage des transformateurs

A. Généralités

Un transformateur peut nécessiter un séchage au cours d'utilisation en cas d'humidité de l'isolation des enroulements ou après la réparation comportant un remplacement partiel ou complet de l'enroulement ou de l'isolation. Dans ce dernier cas, le séchage se fait quelle que soit la valeur de la résistance d'isolement de ses enroulements.

En déterminant la nécessité de séchage des transformateurs il convient de se guider des considérations suivantes [11]:

a) après une grosse réparation, les transformateurs de tension 35 kV et moins peuvent être remis en service sans séchage, si leur partie enlevable s'est trouvée dans l'air ayant une humidité égale ou supérieure à 75 % pendant 24 heures, au maximum;

b) si, au cours de la réparation, la température de la partie enlevable est maintenue à un niveau d'au moins de 3 à 5 °C supérieur à la température de l'air ambiant, la durée de séjour de la partie enlevable dans l'air peut être triplée;

c) le transformateur peut être ouvert pour la réparation à condition que la température de l'air ambiant est sensiblement égale ou inférieure à la température des couches supérieures de l'huile du transformateur; pour une humidité relative de l'air supérieure à 75 %, la température des couches supérieures de l'huile doit être, avant l'ouverture

du transformateur, supérieure d'au moins 10 °C à la température de l'air.

La nécessité de séchage après une révision générale des transformateurs dont la partie enlevable s'est trouvée à l'air libre pendant une durée supérieure à celle indiquée plus haut ou à une humidité élevée, est déterminée à partir des mesures correspondantes de la résistance d'isolement, de la capacité et de l'angle de pertes. La mise sous tension des transformateurs après leur montage, sans procéder au séchage, n'est possible que lorsqu'on réalise certaines conditions [11].

Le procédé le plus efficace permettant le séchage de la partie enlevable du transformateur est son séchage dans sa propre cuve sous vide et le chauffage par la méthode de pertes dans le fer de la cuve.

Le transformateur peut être également séché par cette méthode mais sans réalisation de vide, à condition d'assurer la ventilation de la partie enlevable à l'air chaud en vue d'éliminer l'humidité.

Le séchage peut se faire également dans une étuve calorifugée spécialement confectionnée à cet effet, avec l'emploi d'air chaud fourni par une soufflante.

Le séchage de l'isolation des petits transformateurs peut être obtenu par la méthode du rayonnement infrarouge [1]. Comme source de rayonnement infrarouge, on utilise généralement des lampes spéciales et, à leur défaut, les lampes d'éclairage ordinaires.

La méthode de séchage par chauffage d'huile qui était employée autrefois pour le séchage de l'isolation des enroulements des transformateurs, est peu efficace et provoque une altération de l'huile et, pour ces raisons, elle est interdite.

B. Séchage d'un transformateur dans sa propre cuve sans vide

Avant de procéder au séchage, on vidange l'huile de la cuve et on essuie à sec cette dernière. Sur la partie enlevable du transformateur on place des thermomètres à résistance ou des thermocouples pour le contrôle de la température.

---

[1]) Voir note d'information n° Э-7/57, mars 1957. Ministère des centrales électriques de l'U.R.S.S. : « Séchage de l'isolation par la méthode du rayonnement infrarouge ».

La partie enlevable du transformateur est remise dans la cuve et fermée par son couvercle.

La cuve de transformateur est calorifugée par deux feuilles d'amiante de 4 à 5 mm d'épaisseur, fixées au moyen d'une ficelle ou d'un ruban (l'emploi des fils de fer n'est pas recommandé); pour le calorifugeage on peut utiliser également des feuilles de tissu de verre. En outre, pour réduire les pertes de chaleur, il est recommandé de placer les transformateurs dans une chambre calorifugée (fig. 1).

Au-dessus de l'isolation de la cuve, on place un enroulement de magnétisation. En l'absence de calorifugeage, l'enroulement de magnétisation est bobiné sur des lattes de bois de 1 et 2 cm d'épaisseur.

Si le transformateur comporte des radiateurs enlevables, il convient de les déposer. Dans le cas de transformateurs à cuves tubulaires ou nervurées, l'enroulement de magnétisation est placé sur la surface latérale, au-dessus des tubes et des nervures. Son placement à travers le fond et le couvercle de la cuve est aussi possible.

Pour obtenir une répartition plus régulière de la température, l'enroulement de magnétisation est bobiné sur la partie inférieure de la cuve, en occupant 40 à 60 % de sa hauteur. En bas de la cuve, les spires sont disposées plus près l'une de l'autre. L'enroulement de magnétisation est réalisé en fil isolé à l'amiante de la marque ПДА; mais il est également possible d'utiliser les fils des autres marques (ПР, ПРТО), en réduisant dans ce dernier cas la charge de courant jusqu'à 60 à 70 % de la charge admissible pour la pose normale. Les renseignements approximatifs relatifs au choix de l'enroulement de magnétisation pour le séchage des transformateurs d'une puissance jusqu'à 1000 kVA à cuves tubulaires sont indiqués, à titre d'exemple, dans le tableau 1 [29].

Ci-dessous nous donnons un exemple de calcul de l'enroulement de magnétisation pour le séchage des transformateurs ayant une puissance supérieure à 1000 kVA [11].

La puissance nécessaire au séchage:

$$P = kF\,(100 - t_0)\,10^{-3}\ \text{kW},$$

où F est la surface de la cuve du transformateur, en m^2; t_0 la température du milieu ambiant, en °C; k un coefficient égal à 5 pour une cuve calorifugée et à 12 pour une cuve non calorifugée.

Tableau 1

Puissance du transformateur, kVA	Périmètre, m	Température du milieu ambiant, °C	Tension appliquée à l'enroulement de magnétisation, V					
			65		120		220	
			Nombre de spires	Courant, A	Nombre de spires	Courant, A	Nombre de spires	Courant, A
100	2,4	0	47/30	37/91	—	—	—	—
		15	52/36	31/74	—	—	—	—
		30	53/39	26/64	—	—	—	—
180	2,54	0	45/33	42/103	—	—	—	—
		15	49/34	35/88	—	—	—	—
		30	50/37	29/72	—	—	—	—
320	2,75	0	42/30	60/124	—	—	—	—
		15	44/32	42/106	—	—	—	—
		30	47/34	35/87	—	—	—	—
560	3,52	0	34/24	80/198	63/45	43/107	—	—
		15	35/26	68/168	67/47	37/91	—	—
		30	38/28	56/138	71/51	30/75	—	—
750	3,94	0	29/21	105/264	54/39	54/143	100/71	32/66
		15	31/22	89/224	57/42	48/121	105/76	28/56
		30	33/24	74/184	61/145	40/100	112/82	23/46
1000	4,04	0	29/21	124/315	53/38	67/170	98/70	37/79
		15	30/22	107/265	56/41	58/144	103/75	31/66
		30	32/24	88/219	60/44	48/119	110/81	29/55

Note. **La valeur au nominateur est valable pour une cuve calorifugée et celle au dénominateur pour une cuve non calorifugée.**

La valeur des pertes spécifiques:

$$\Delta P = \frac{P}{F_0} \text{ kW/m}^2,$$

où F_0 est la surface de la cuve embrassée par l'enroulement de magnétisation, en m².

La valeur de cette surface:

$$F_0 = lh,$$

où l est le périmètre de la cuve, en m; h la hauteur de la surface latérale occupée par l'enroulement de magnétisation, en m.

Le nombre de spires de l'enroulement de magnétisation:

$$W=\frac{UA}{L},$$

où U est la tension appliquée à l'enroulement, en V; L la longueur d'une spire, en m; A la longueur de l'enroulement de magnétisation par 1 V de la tension appliquée à l'enroulement.

La valeur de A est donnée par le tableau 2.

Le courant dans l'enroulement de magnétisation:

$$I=\frac{P}{U\cos\varphi},$$

où $\cos\varphi = 0{,}5$ à $0{,}7$.

Exemple d'application. Calculons les caractéristiques de l'enroulement de magnétisation pour le séchage d'un transformateur du type TM 1800/10.

Le périmètre de la cuve $l = 4{,}66$ m, la surface de la cuve $F = 14{,}6$ m. La cuve de transformateur est calorifugée, la température de l'air ambiant $t_0 = 20$ °C.

La puissance nécessaire au séchage:

$$P = kF\,(100 - t_0)\cdot 10^{-3} = 5\cdot 14{,}6\,(100 - 20)\cdot 10^{-3} = 5{,}84 \text{ kW}$$

Prenons la hauteur h égale à 1,4 m.

La surface de la cuve occupée par l'enroulement:

$$F_0 = lh = 4{,}66\cdot 1{,}4 = 6{,}5 \text{ m}^2.$$

Les pertes spécifiques:

$$\Delta P=\frac{P}{F_0}=\frac{5{,}84}{6{,}5}=0{,}9 \text{ kW/m}^2.$$

Dans le tableau 2, pour $\Delta P = 0{,}9$ on trouve $A = 1{,}9$.

Le nombre de spires de l'enroulement de magnétisation pour une tension de 127 V:

$$W=\frac{UA}{L}=\frac{127\cdot 1{,}9}{4{,}66}=52.$$

L'intensité du courant dans l'enroulement de magnétisation :

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{5840}{127 \cdot 0,6} \approx 77 \text{ A}.$$

Pour la réalisation de l'enroulement de magnétisation on prend un fil de 25 mm² de section.

Comme source d'alimentation de l'enroulement de magnétisation on peut utiliser un transformateur de soudage,

Tableau 2

ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A	ΔP	A
0,1	4,21	1,0	1,85	1,9	1,47	2,8	1,27
0,2	3,20	1,1	1,78	2,0	1,44	2,9	1,26
0,3	2,76	1,2	1,72	2,1	1,42	3,0	1,24
0,4	2,48	1,3	1,68	2,2	1,39	3,25	1,20
0,5	2,30	1,4	1,63	2,3	1,37	3,50	1,18
0,6	2,17	1,5	1,60	2,4	1,35	3,75	1,15
0,7	2,06	1,6	1,55	2,5	1,32	4,0	1,12
0,8	1,97	1,7	1,53	2,6	1,31	—	—
0,9	1,90	1,8	1,49	2,7	1,29	—	—

un transformateur de chauffage du béton ou un réseau de 127/220 V.

Au cours du séchage, la partie enlevable du transformateur est ventilée pour évacuer l'humidité au moyen d'un ventilateur qui aspire l'air à travers l'une des trappes du couvercle du transformateur ou à travers l'orifice prévu pour l'isolateur. L'air est admis dans la cuve à travers la bride du robinet de vidange d'huile et s'échauffe au préalable par des réchauds électriques placés sur le fond du transformateur (fig. 1). On peut également assurer une ventilation naturelle, en plaçant sur le couvercle de la cuve une cheminée de 2 à 2,5 m de hauteur. L'air admis dans la chambre calorifugée est dirigé à travers l'orifice pratiqué dans la partie inférieure. La température de la cuve ne doit être élevée que de façon progressive, la vitesse de croissance de température ne devant pas être supérieure à 30 ou 40 degrés/h. La température de l'air chaud à l'intérieur de la cuve doit être maintenue à un niveau de 100 à 105 °C. Le

réglage de la température est obtenu soit par modification du nombre de spires de l'enroulement de magnétisation, soit par un débranchement périodique de celui-ci. Dans le dernier cas, il convient de prévoir une ou deux prises sur l'enroulement de magnétisation.

Pour intensifier le séchage, il est recommandé d'abaisser périodiquement la température jusqu'à 50 ou 60 °C et de l'élever ensuite jusqu'à 100 ou 105 °C.

Au cours du séchage, on doit dresser un journal dans lequel on inscrit chaque heure les indications de tous les thermomètres, l'intensité du courant, la tension et le nombre

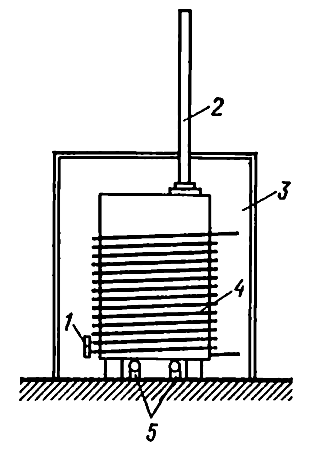


Fig. 1. Schéma pour le séchage d'un transformateur dans sa propre cuve :

1 : bride du robinet de vidange d'huile ; 2 : tube de ventilation ; 3 : chambre calorifugée ; 4 : enroulement de magnétisation ; 5 : réchaud électrique

de spires de l'enroulement de magnétisation et, toutes les deux heures, la résistance d'isolement entre enroulements et entre enroulement et masse.

La fin de séchage est déterminée d'après la forme de la courbe traduisant la variation de la résistance d'isolement (cette courbe est analogue à celle de la résistance d'isolement lors du séchage des machines électriques, voir annexe 10, fig. 13). Le séchage est considéré comme terminé, si la résistance d'isolement présente une valeur stable pendant 6 à 8 heures pour une température établie de 100 à 105 °C.

Après le séchage, on procède à l'examen de la partie enlevable, on retire les thermomètres et on vérifie les serrages des fixations, puis on remet dans la cuve la partie enlevable du transformateur et on remplit la cuve avec une huile sèche et propre.

ANNEXE 12

Mesure des jeux, des battements et des vibrations

A. Mesure des entrefers entre le rotor et le stator

Les entrefers ordinaires sont mesurés à l'aide de cales d'épaisseur de 250 mm de longueur, constituées par un jeu de lames calibrées, et les grands entrefers (dans les turbo-alternateurs) au moyen d'une cale spéciale. Si une telle cale n'est pas disponible, on peut confectionner un jeu de cales d'épaisseur (fig. 1), en utilisant un fil d'acier de 2 à 3 mm de diamètre et les vérifier au pied à coulisse. Une

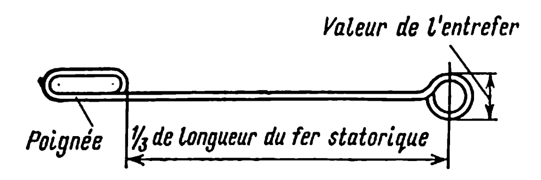


Fig. 1. Cale d'épaisseur pour la mesure de longs entrefers entre le rotor et le stator

telle cale est introduite à plat dans l'entrefer, parallèlement à l'axe de la machine et, pour effectuer la mesure elle est tournée de 90° (pour prendre la position représentée par la fig. 1).

Lors de ces mesures, la cale d'épaisseur doit être mise en contact avec le fer de stator (d'inducteur) d'une part et le fer de rotor (d'induit) d'autre part, en évitant qu'elle se trouve sur une cale d'encoche ou sur une frette. Il faut veiller à ce que les endroits où sont effectuées les mesures et la surface de la cale d'épaisseur soient en parfait état de propreté.

L'entrefer est à mesurer de deux côtés de la machine en plusieurs, généralement en quatre points, décalés de 90° l'un par rapport à l'autre. Dans les machines de gros diamètre l'entrefer est mesuré en six ou en huit points. Dans les machines à courant continu et dans les machines synchrones à pôles saillants, les mesures sont faites au milieu de chaque pôle. Les mesures sont à effectuer 3 ou 4 fois, en tournant chaque fois le rotor ou l'induit de 90°. Pour la valeur moyenne de l'entrefer en chaque point donné on

prend la moyenne arithmétique de toutes les valeurs obtenues en ce point.

Si les mesures effectuées en tous les points, donnent pour les différentes positions du rotor des valeurs des entrefers qui diffèrent considérablement l'une de l'autre, il est nécessaire de vérifier la coaxialité du stator et du rotor et la cylindricité de leurs surfaces.

Pour vérifier la forme de l'alésage du stator, on divise sa circonférence en 6, 8, 12, etc. parties (fig. 2) suivant le diamètre du stator. Dans les machines à courant continu, on prend un nombre de points égal au nombre de pôles.

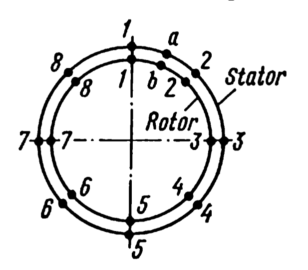


Fig. 2. Vérification de l'alésage du stator et de la cylindricité du rotor

On amène en regard de chaque point du stator ou de chaque pôle un seul et même point du rotor ou de l'induit (point *b*) et on mesure l'entrefer. On procède de la même façon pour vérifier la cylindricité de la surface du rotor, en divisant son circonférence de manière à obtenir le même nombre de parties égales. Dans les machines synchrones à pôles saillants, le nombre de points est pris égal au nombre de pôles. Lors de cette vérification, on amène chacun des points indiqués du rotor en regard d'un seul et même point (point *a*) du stator et on mesure l'entrefer.

L'entrefer moyen de la machine est donné par la moyenne arithmétique de toutes les mesures. Les écarts les plus grands par rapport à l'entrefer moyen correspondent aux points où le plus grand rayon du stator est amené en coïncidence avec le plus petit rayon du rotor et le plus petit rayon du stator avec le plus grand rayon du rotor. Pour faciliter l'analyse des résultats il est recommandé de les inscrire sous la forme indiquée par le tableau 1.

Le réglage de l'entrefer entre le rotor et le stator est obtenu en modifiant l'épaisseur et le nombre de cales interposées sous les pattes du stator et en déplaçant le stator

Tableau 1

Points du stator	Points du rotor					
	1	2	3	4	5	6
1						
2						
3						
4						
5						
6						

dans le sens horizontal. Parfois, lors du montage, on abaisse le stator de 0,2 à 0,3 mm, mais dans les limites des écarts admissibles, pour obtenir un entrefer un peu plus grand en bas qu'en haut de la machine.

Les écarts maximaux des entrefers mesurés ne doivent pas dépasser (d'après les recommandations de l'usine « Elektrossila ») les valeurs suivantes :

Entrefer en mm :		Ecart admissible :
minimal mesuré	jusqu'à 0,5	+ 10%
moyen mesuré	de 0,6 à 10	± 10%
moyen mesuré	de 10 à 20	± 1 mm
moyen mesuré	supérieur à 20	± 5%

Pour les pôles auxiliaires des machines à courant continu, l'écart admissible par rapport à l'entrefer moyen est de ±5 %.

B. Mesure des jeux dans les paliers

Le jeu entre la partie supérieure du coussinet et le tourillon de l'arbre est mesuré le plus souvent avec un fil de plomb ayant un diamètre de l'ordre de 1 mm et une longueur de 40 à 50 mm. On place des morceaux d'un tel fil sur les plans de démontage du demi-coussinet inférieur, de deux côtés, ainsi que sur l'arbre, comme il est indiqué sur la fig. 3, *a*. Ensuite, on installe la partie supérieure du coussinet et le chapeau du palier et l'on serre les boulons en provoquant l'aplatissement des morceaux de fil.

D'après l'épaisseur de ces fils, mesurée au micromètre, on détermine les jeux supérieurs entre le tourillon de l'arbre et la partie supérieure du coussinet. Ces jeux a_1 et a_2 dans

le plan transversal A_1A_1 et A_2A_2 seront donnés respectivement par les expressions:

$$a_1 = c_1 - \frac{b_1 + b_2}{2}; \quad a_2 = c_2 - \frac{b_3 + b_4}{2},$$

dans lesquelles c_1, c_2, b_1, b_2, b_3 et b_4 sont les épaisseurs des fils correspondants. La différence entre a_1 et a_2 ne doit pas être supérieure à 10 %.

Le jeu entre le chapeau du palier et le coussinet supérieur ne doit pas dépasser 0,05 mm. Sa valeur peut être déterminée à l'aide de morceaux du même fil de plomb

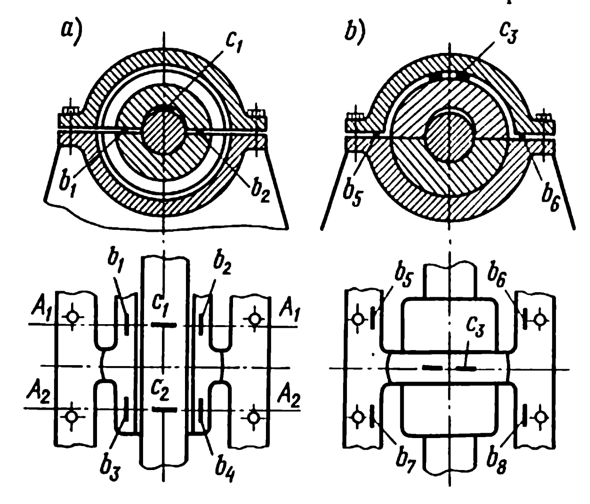


Fig. 3. Mesure des jeux:
a: entre la portée d'arbre et le coussinet; *b*: entre le couvercle du palier et le coussinet supérieur

placés entre le chapeau du palier et le demi-coussinet supérieur ainsi que sur le plan d'assemblage du couvercle supérieur du palier et le bâti (fig. 3, *b*). Le jeu entre le couvercle du palier et le coussinet aura pour expression:

$$a_3 = c_3 - \frac{b_5 + b_6 + b_7 + b_8}{4},$$

où c_3, b_5, b_6, b_7 et b_8 sont les épaisseurs des fils aplatis correspondants. Les dimensions des fentes cunéiformes (les jeux latéraux) sont mesurées à l'aide de cales, le rotor étant placé dans ses paliers.

Les jeux dans les paliers doivent correspondre aux valeurs préconisées par le constructeur. Dans le cas où les prescriptions du constructeur manquent, on peut se conformer aux indications données plus loin.

En déterminant la valeur nécessaire des jeux il faut ne pas perdre de vue que d'après la théorie hydrodynamique du graissage, une augmentation du jeu au-dessus de la valeur exigée pour des conditions de fonctionnement données, fait diminuer l'effort de levée dû au coin d'huile et l'épaisseur de la couche lubrifiante. Il en résulte une réduction de la capacité de charge du palier et une croissance des pertes par frottement. Pour toutes ces raisons, le jeu dans les paliers des machines à faible vitesse est réglé à une valeur plus faible que dans les machines à grande vitesse, étant donné que pour assurer un effort de levée nécessaire du coin d'huile on doit aménager un jeu moins important, d'autant plus faible que la charge du tourillon est plus élevée. Lorsque les tourillons tournent à de grandes vitesses, les conditions pour la formation de coin d'huile sont plus favorables, si bien que les jeux dans les paliers des machines à grande vitesse peuvent être rendus plus grands que dans les machines à petite vitesse.

Dans les paliers non démontables (dans les douilles de palier) des petites machines lubrifiées par bagues, on utilise généralement un ajustement très libre de l'arbre dans les douilles, en assurant la 2-ième, la 3-ième ou la 4-ième classe de finition. C'est seulement pour des vitesses de rotation inférieures à 1000 tr/mn que certains constructeurs ont

Tableau 2

Jeux dans les coussinets monoblocs

Diamètre de l'arbre, mm	Vitesse de rotation, tr/mn		
	jusqu'à 1000	de 1000 à 1500	supérieure à 1500
	limites du jeu supérieur (vertical), mm		
18 à 30	0,04 à 0,093	0,060 à 0,130	0,14 à 0,280
30 à 50	0,05 à 0,112	0,075 à 0,160	0,170 à 0,340
50 à 80	0,065 à 0,135	0,095 à 0,195	0,200 à 0,400
80 à 120	0,080 à 0,160	0,120 à 0,235	0,230 à 0,460
120 à 180	0,100 à 0,195	0,150 à 0,285	0,260 à 0,530

recours à l'ajustement légèrement libre de 2-ième classe de finition. Les valeurs limites des jeux diamétraux (supérieurs) entre le tourillon de l'arbre et la douille dans les coussinets monobloc à graissage par bagues sont rassemblées à titre indicatif dans le tableau 2. Les données indiquées dans ce tableau sont applicables aux machines jusqu'à 1000 kW ayant une vitesse de rotation jusqu'à 1500 tr/mn y compris, et aux machines jusqu'à 200 kW pour une vitesse de 3000 tr/mn.

Les jeux diamétraux (supérieurs) *a* (fig. 4) dans les coussinets à coquilles lubrifiés par bagues sont généralement compris entre 0,15 et 0,25 % du diamètre du tourillon de

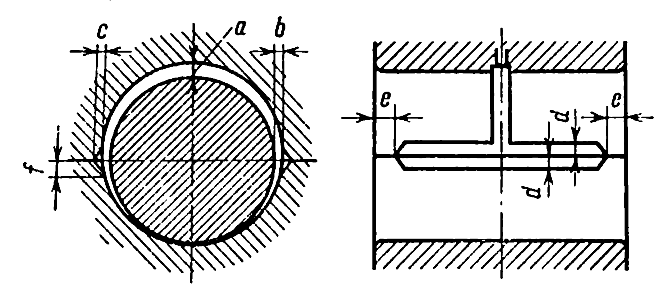


Fig. 4. Jeux dans les paliers

l'arbre. La limite supérieure se rapporte aux machines à grande vitesse et la limite inférieure aux machines à faible vitesse. **On suppose évidemment dans ce cas que le jeu diamétral indiqué correspond à un alésage cylindrique du coussinet** parce qu'il ne détermine la forme du coin d'huile entre le tourillon et le coussinet que si cette condition est réalisée.

Les jeux latéraux (horizontaux) *b*, rapportés au plan de démontage, sans prise en compte des cannelures longitudinales (poches d'huile) doivent être égaux, par côté, à 0,5 de jeu supérieur.

Dans les paliers à graissage par circulation, les jeux diamétraux sont plus grands que dans les paliers à graissage par bagues, étant donné qu'avec de grandes vitesses circonférencielles et charges considérables, le refroidissement du tourillon et du coussinet exige un débit d'huile plus élevé. **L'augmentation du jeu diamétral ne doit pas affecter la valeur du coin d'huile**, à quoi on arrive en con-

servant un rayon d'alésage nécessaire de la partie inférieure du coussinet. Le plus souvent, les jeux diamétraux des paliers à graissage par circulation sont compris entre 0,25 et 0,40 % du diamètre du tourillon et, dans certains cas, ils atteignent jusqu'à 1,2 %.

Les dimensions approchées des cannelures longitudinales (des poches d'huile) dans les coussinets à coquilles sont réunies dans le tableau 3.

Tableau 3

Cote sur la fig. 4	Diamètre du coussinet, mm													
	45 à 50	60 à 70	80 à 90	100 à 110	125 à 140	160 à 180	200 à 220	240 à 260	280 à 300	320 à 340	360 à 380	400 à 420	440 à 460	480 à 500
	Dimensions des cannelures longitudinales dans les coussinets à coquilles, mm													
c	1	1	1,5	2	2	3	4	4,5	5	6	7	7,5	8	9
d	7	8	10	13	16	20	25	33	35	40	45	50	55	60
e	8	8	10	10	12	12	15	15	18	18	20	20	25	25

S'il s'avère nécessaire d'augmenter dans la partie supérieure du coussinet le jeu diamétral entre le tourillon et le coussinet, on pratique une gorge de profondeur appropriée. Pour réduire l'échappement de l'huile le long de l'axe du coussinet, cette gorge est réalisée de manière qu'elle n'atteigne pas les bords, en laissant, près des faces terminales, des collerettes à diamètre normal exigé de l'alésage du coussinet.

C'est ainsi que l'augmentation indiquée du jeu diamétral doit être obtenue par un usinage spécial de la partie supérieure du coussinet. Pourtant, si lors du réglage de la machine ou lors de sa réparation d'urgence, il est impossible de procéder à un tel usinage, on peut admettre, en guise de mesure temporaire, la pose de cales d'épaisseur (fig. 5) entre les deux coussinets. Ces cales qu'on découpe en tôles d'acier épaisses de 0,1 à 0,2 mm doivent avoir la même épaisseur sur toute la longueur et ne doivent fermer ni les poches d'huile, ni les trous pour boulons et goujons ni ceux pour le passage de l'huile.

On ne perdra pas de vue qu'en appliquant cette méthode pour augmenter le jeu diamétral, on devra également intro-

duire des cales entre les deux moitiés du corps de palier, ce qui est fort indésirable et ne peut être toléré qu'à titre d'une utilisation temporaire. En règle générale, on devra éviter de poser un grand nombre de cales.

Quant aux jeux latéraux (horizontaux) dans les coussinets on les augmente par grattage.

Pour diminuer les jeux, il est, le plus souvent, nécessaire de procéder au regarnissage du palier. En l'absence de cales d'épaisseur, un jeu diamétral peut être diminué par enlèvement de matière sur la surface du joint des coussinets

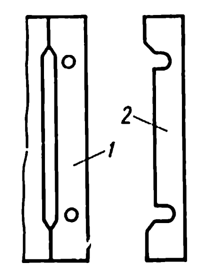


Fig. 5. Cale d'épaisseur entre les coussinets:
1 : coussinet; 2 : cale d'épaisseur

supérieur et inférieur, suivi d'un raclage sur un marbre à roder avec une adhérence de l'ordre de deux taches par 1 cm².

Dans de tels cas, il est nécessaire d'interposer entre le chapeau du palier et le coussinet une cale d'épaisseur assurant la conjugaison prescrite par le constructeur du coussinet au corps du palier (le jeu ordinaire est près de 0,05 mm).

Les jeux dans les roulements à billes et les roulements à rouleaux sont mesurés à l'aide d'un jeu de cales d'épaisseur. A cet effet, la cale est introduite entre les pièces de roulement et la bague extérieure du roulement dans une zone non chargée.

Les jeux pour les arbres ayant un diamètre jusqu'à 25, jusqu'à 100 et supérieur à 100 mm ne doivent être supérieurs respectivement à 0,1 ; 0,2 et 0,3 mm.

Les paliers à roulements (à billes et à rouleaux) neufs, destinés aux arbres d'un diamètre jusqu'à 100 mm et supérieur à 100 mm, comportent des jeux qui sont compris respectivement entre 0,01 et 0,10 mm et entre 0,06 et 0,30 mm.

Pour le fonctionnement normal de la machine il est aussi nécessaire d'assurer des jeux bien déterminés entre les faces terminales des paliers et les épaulements (congés)

de l'arbre. Ces jeux sont mesurés également avec des cales d'épaisseur.

Lorsque la machine tourne, son rotor (induit) tend, sous l'effet des forces magnétiques, à se mettre dans une position telle que la conductivité magnétique du circuit soit maximale. Cela correspond à des positions relatives du rotor et du stator pour lesquelles les plans de symétrie du fer actif du stator et du rotor, perpendiculaires à l'arbre, se trouvent amenés en coïncidence. Si les jeux axiaux sont insuffisants, les congés de l'arbre peuvent buter, lors du fonctionnement de la machine, sur les faces terminales des coussinets, en provoquant une fusion de ceux-ci et d'autres anomalies. C'est pourquoi, les jeux axiaux doivent être choisis, des deux côtés des faces terminales des coussinets, compte tenu

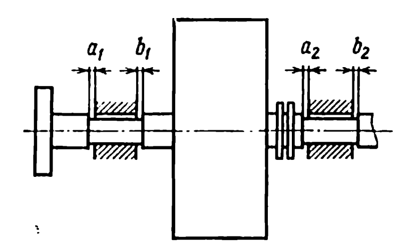


Fig. 6. Jeux axiaux entre les faces terminales des coussinets de paliers et les épaulements de l'arbre

de la dilatation thermique de l'arbre dans le sens depuis le manchon d'accouplement vers le palier avant (du côté du collecteur ou des bagues collectrices). Cela signifie que la position de l'arbre à froid doit être réglée de manière que les jeux a_1 et b_1 (fig. 6) soient sensiblement identiques et que le jeu a_2 soit supérieur au jeu b_2 pour que ces deux derniers jeux s'égalisent à l'état chaud et en pleine charge.

Dans les groupes constitués de plusieurs machines accouplées la valeur des jeux axiaux doit être réglée dans l'hypothèse où la dilatation thermique des arbres se produit à partir du milieu du groupe vers les paliers extrêmes. Les valeurs des jeux axiaux sont fixées par le constructeur. Quand les prescriptions du constructeur manquent, on part généralement de la supposition que la dilatation de l'arbre est égale à 0,5 mm par 1 m de longueur lorsque sa température s'élève de 40 °C. Dans les grosses machines (comportant les arbres d'un diamètre supérieur à 200 mm), le jeu axial dans les deux sens, à partir de la position centrale, constitue approximativement 2 % du diamètre du tourillon.

C. Mesure des battements

Un faux-rond de rotation des parties tournantes est déterminé à l'aide d'un comparateur de type montre.

Pour mesurer le faux-rond d'un arbre, il convient de placer le comparateur soit sur la surface du joint du bâti de palier, soit sur un autre support rigide (fig. 7). La circonférence à vérifier est divisée en 8 parties égales et le palpeur du comparateur est mis sur la partie supérieure de la surface à vérifier, après avoir réglé au zéro l'aiguille du comparateur. En faisant tourner (à la main ou avec une grue) le rotor, on inscrit les indications lues sur le comparateur pour chacune des huit positions. Pour faciliter la

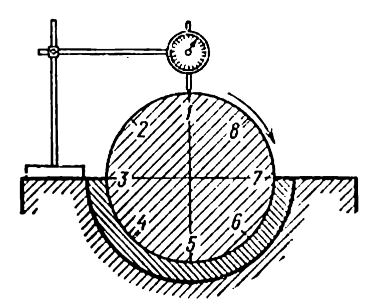


Fig. 7. Vérification du faux-rond

rotation du rotor il convient d'enduire d'huile les tourillons de l'arbre. Les indications du comparateur sont inscrites avec le signe « + » ou « — » suivant le sens de déviation de son aiguille. Une différence entre les indications de l'appareil témoigne soit d'une excentricité de la surface vérifiée soit d'un gauchissement de l'arbre.

La valeur du gauchissement de l'arbre par rapport à son axe est égale à la moitié du faux-rond. Pour pouvoir effectuer des mesures correctes il est nécessaire, avant la lecture de la valeur du faux-rond, de s'assurer de l'installation correcte du comparateur et de sa bonne fixation. A cet effet, il convient de frapper légèrement avec la main le comparateur; si, après ces coups légers, son aiguille revient en position de départ, c'est l'indice que le montage du comparateur est correct. Si les indications obtenues lors de la deuxième mesure du faux-rond au point 1 sont les mêmes que celles lues pendant la première mesure au même point cela prouve que le comparateur n'a pas été déplacé au cours des

mesures. Pour éviter des erreurs, il convient d'affaiblir, à chaque mesure, la tension du câble servant à faire tourner le rotor; il faut aussi vérifier le bon ajustement des coussinets dans l'alésage du bâti de palier et s'assurer que le rotor ne frotte sur aucune partie de la machine. Pour exclure des erreurs aléatoires, il faut reprendre les mesures 2 ou 3 fois, en déplaçant à chaque fois le comparateur le long de l'axe.

Le faux-rond maximal toléré des tourillons est de 0,02 mm pour les diamètres de 100 à 200 mm et de 0,03 mm pour les diamètres supérieurs à 200 mm. Aux endroits de montage

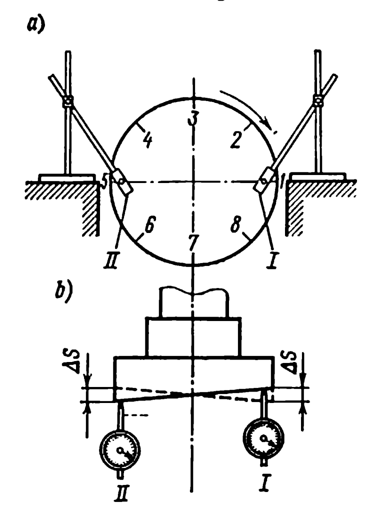


Fig. 8. Vérification du voilement d'un demi-manchon d'accouplement

des dispositifs d'étanchéité, le faux-rond ne doit pas dépasser 0,05 à 0,06 mm. A d'autres endroits, le faux-rond maximal toléré de l'arbre du rotor est de 0,06 à 0,08 mm pour les machines à grande vitesse (3000 tr/mn) et de 0,10 à 0,12 mm pour les machines à faible vitesse.

Le voilement du bout d'un demi-manchon d'accouplement est vérifié au moyen de deux comparateurs installés aux points diamétralement opposés sur le bout du demi-manchon (fig. 8), à la même distance de l'axe de rotation. L'emploi de deux comparateurs permet d'exclure les erreurs qui peuvent provenir des déplacements axiaux possibles du rotor au cours des mesures.

Pour cette mesure, la circonférence du plateau du manchon est divisée aussi en un nombre pair de parties égales,

en huit parties par exemple. Les palpeurs des comparateurs sont appuyés sur le bout du demi-accouplement à une distance de 10 à 15 mm du bord. Le voilement du bout du demi-manchon est déterminé à partir de huit paires de lectures faites sur les comparateurs respectivement pour huit positions différentes du rotor. Pour trouver la valeur du voilement du demi-manchon, on détermine sur un diamètre quelconque la somme des indications des deux comparateurs pour un seul et même point sur le bout du manchon pour deux positions de l'arbre : avant et après sa rotation de 180°.

Si, pour la position initiale du rotor, l'indication du comparateur I au point *1* est I_1 et l'indication du comparateur II au point *5* est II_5 , tandis qu'après la rotation du rotor de 180° (voir le trait en pointillé sur la fig. 8, *b*), les indications des comparateurs sont respectivement I_5 et II_1, le voilement Δs du bout du demi-manchon sur le diamètre 1-5 peut être déterminé par la formule :

$$\Delta s = \frac{(I_1 + II_1) - (I_5 + II_5)}{2}.$$

Les valeurs de I_1, I_5, II_1 et II_5 figurant dans cette formule sont prises avec le signe « + » lorsque le palpeur se déplace vers le comparateur et avec le signe « — » s'il se déplace vers le manchon.

Si la valeur de Δs est positive cela signifie que le point 1 fait saillie par rapport au point 5 dans le sens du comparateur. Si les comparateurs sont installés à des distances différentes de l'axe de rotation, le voilement doit être rapporté à la distance entre les palpeurs des comparateurs.

Il est recommandé de rassembler les résultats des mesures et des calculs sous forme d'un tableau pareil au tableau 4.

L'exemple indiqué dans le tableau 4 montre que le voilement maximal aura lieu sur le diamètre 1-5, au point 5.

Pour éviter les erreurs aléatoires il convient de répéter toutes les mesures deux ou trois fois, en déplaçant le comparateur à chaque fois, vers le centre de 5 à 10 mm. En outre, pour s'assurer que les comparateurs n'ont subi aucun déplacement au cours des mesures, il convient de remettre le rotor dans sa position de départ (*1-5*) et d'effectuer à nou-

Tableau 4

Vérification du voilement du bout d'un demi-manchon d'accouplement

Numéro du point (fig. 8, a)	Indications des comparateurs, mm		Somme des indications des comparateurs, mm
	I	II	
1	0,00	0,00	0,00
2	+0,01	—0,02	—0,01
3	—0,03	+0,01	—0,02
4	+0,05	+0,02	+0,07
5	+0,08	0,00	+0,08
6	+0,04	—0,01	+0,03
7	+0,05	—0,07	—0,02
8	+0,04	—0,01	+0,03

Voilement suivant les diamètres, mm

1—5	2—6	3—7	4—8
—0,04	—0,02	0,00	+0,02

veau deux mesures; la différence entre les indications des comparateurs, en l'absence de déplacement, doit être égale à la différence initiale.

Les valeurs maximales tolérées des battements radial et axial sont de 0,03 à 0,04 mm pour les accouplements rigides et 0,06 mm pour les accouplements semi-élastiques. Pour les accouplements rigides des machines à grande vitesse des turbo-alternateurs, par exemple, le battement axial ne doit pas dépasser 0,02 à 0,03 mm.

Le faux-rond du collecteur est vérifié, en tournant lentement le rotor. La présence d'interstices entre les lames du collecteur rend difficile la mesure de son faux-rond, si l'extrémité du palpeur a sa forme habituelle. Pour tourner cette difficulté, on met sur l'extrémité du palpeur un embout plat.

Le faux-rond toléré des collecteurs dans les machines rapides à vitesse circonférentielle du collecteur jusqu'à 50 m/s, par exemple dans les turbo-alternateurs, ne doit pas dépasser 0,02 à 0,03 mm alors que pour les machines à faible vitesse on peut tolérer, sans compromettre leur bon fonctionnement, des faux-ronds sensiblement plus élevés.

D. Mesure et normes de vibrations

Bien que les rotors de toutes les machines électriques tournantes soient obligatoirement équilibrés en usine (voir annexe 14) ils peuvent présenter un certain déséquilibre résiduel (un balourd).

D'après les Normes soviétiques GOST 12327-66* relatives aux machines à rotors *rigides* (voir annexe 14) ayant une masse de 0,01 à 1000 kg et une vitesse de travail jusqu'à 30000 tr/mn, les rotors se classent, suivant leur masse, en trois groupes : les *microrotors* ayant une masse de 0,01 à 1 kg, les *petits rotors* de 1 à 3 kg et les *rotors moyens* de 3 à 1000 kg. Ces normes ne s'étendent pas aux moteurs utilisés pour la commande des appareils de levage et dans la métallurgie et définis par les Normes GOST 3940-71, 184-71 et 185-70.

Pour les rotors des machines normalisées par GOST 12327-66* on définit trois classes de précision d'équilibrage : zéro, première et deuxième. Si la documentation technique sur une machine ne contient aucune mention concernant la classe de précision d'équilibrage, cela signifie qu'on a adopté pour cette machine la deuxième classe de précision.

Ces normes contiennent des recommandations sur le choix de la classe de précision et sur la technologie de l'équilibrage et indiquent les valeurs tolérées du balourd résiduel pour les rotors de trois groupes indiqués plus haut (voir annexe 14).

Pour élaborer les normes d'Etat uniques relatives aux vibrations des machines électriques il faut se guider des normes établies pour des machines de types correspondants et, si ces dernières manquent, il faut se conformer aux normes temporaires adoptées par les usines des constructions électriques.

Conformément à GOST 12379-66, pour l'évaluation des vibrations d'une machine électrique, on doit prendre, comme grandeur principale à mesurer, la *valeur efficace de la vitesse vibratoire* mais, avant l'introduction des normes d'Etat uniques relatives aux vibrations il est admis de mesurer le *déplacement vibratoire* ou l'*accélération vibratoire* (voir annexe 14).

Le déplacement, la vitesse et l'accélération vibratoires des paliers sont mesurés à l'aide de vibrographes ou vibromètres dans trois directions perpendiculaires entre elles : 1) verticale : sur le chapeau, au-dessus de l'axe de rotation

du rotor; 2) horizontale: sur la ligne du joint en regard du milieu du coussinet; 3) axiale: sur la ligne du joint, aussi près que possible de l'axe de rotation (fig. 9).

Pour des vitesses de rotation de l'arbre inférieures à 500 tr/mn, l'amplitude crête à crête du déplacement vibratoire peut être mesurée à l'aide d'un comparateur de type montre.

Les normes GOST 16921-71, valables pour les machines électriques tournantes ayant une masse *de 0,25 à 2000 kg*

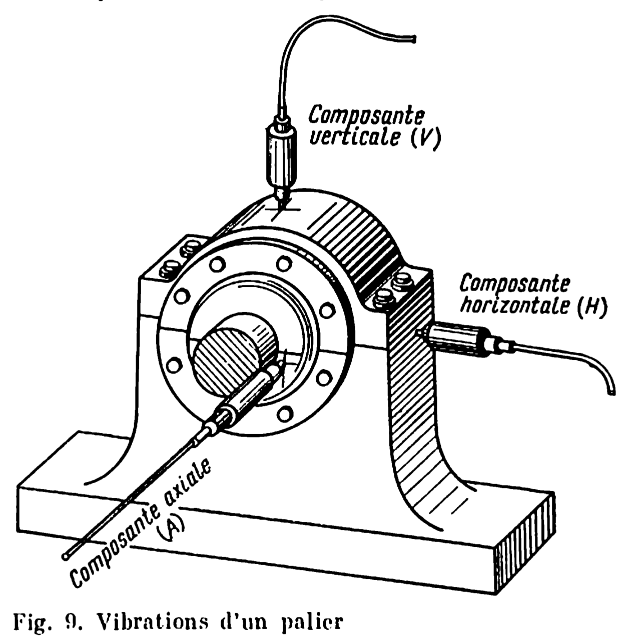


Fig. 9. Vibrations d'un palier

et une vitesse de travail de 600 à 12000 tr/mn, adoptent comme paramètre réglementaire de la vibration des machines, la valeur efficace maximale des vitesses vibratoires mesurées dans une gamme de fréquences qui s'étend de la fréquence correspondant à la vitesse de régime, jusqu'à 2000 Hz.

Pour l'évaluation de la vibration des machines assemblées lors des essais de réception en usine, on définit huit classes suivant la valeur des vibrations de la machine. Les indices de ces classes sont désignés par les nombres suivants: 0,28; 0,45; 0,7; 1,1; 1,8; 2,8; 4,5 et 7,0. Chacun de ces nombres est égal à la valeur efficace maximale admis-

sible de la vitesse vibratoire exprimée en mm/s pour les machines de la classe donnée.

D'après les normes GOST 12379-75, les paramètres caractérisant la vibration de ces machines doivent être mesurés en usine lors des essais de type ou des essais de contrôle, conformément au programme des essais établi dans les normes d'Etat ou dans le cahier des charges pour les machines des types correspondants.

Jusqu'à présent, en dehors des normes GOST 16921-71 (relatives aux machines d'une masse jusqu'à 2000 kg), les normes d'Etat n'établissent les normes de vibrations admissibles que pour les compensateurs synchrones, les turbo-alternateurs et les alternateurs hydrauliques.

En tous les régimes de fonctionnement prévus par des normes correspondantes, l'amplitude crête à crête de vibration (déplacement vibratoire) ne doit pas dépasser:

— pour les paliers de compensateurs synchrones (GOST 609-75, vitesse de rotation: 750 et 1000 tr/mn): 80 microns au niveau de l'axe de l'arbre;

— pour les paliers d'un turbo-alternateur et de son excitatrice (GOST 533-76, vitesse de rotation: 3000 tr/mn) sur les couvercles supérieurs, près du plan du joint, dans trois directions: verticale, transversale et axiale, la valeur efficace maximale de la vitesse vibratoire: $v_{eff} = 4{,}5$ mm/s.

En outre, les normes OST 160688013-71, établissent pour les essais des turbo-alternateurs en plate-forme en usine les valeurs admissibles du déplacement vibratoire des bâtis de paliers: 40 microns au passage de la première vitesse critique; 25 microns à la vitesse de rotation nominale; 200 microns pour bagues collectrices et 75 microns pour noyaux des stators.

A la mise en service des turbo-alternateurs neufs et après leur réparation comportant la sortie du rotor, la valeur maximale admissible du déplacement vibratoire des bâtis de paliers est de 30 microns.

Dans le cas des alternateurs hydrauliques (GOST 5616-72), la valeur admissible du déplacement vibratoire d'un alternateur hydraulique vertical comportant des paliers de guidage incorporés, ou celle du déplacement vibratoire d'un turbo-alternateur hydraulique horizontal ne doit pas dépasser, en tous les régimes de fonctionnement à la vitesse de rotation nominale: 180 microns à la vitesse de rotation nominale jusqu'à 100 tr/mn; 150 microns à la vitesse de

rotation nominale jusqu'à 187,5 tr/mn; 100 microns à la vitesse de rotation nominale jusqu'à 375 tr/mn et 70 microns à la vitesse de rotation nominale jusqu'à 750 tr/mn.

Le déplacement vibratoire toléré (amplitude crête à crête des vibrations) du noyau du stator ne doit pas dépasser 30 microns pour une fréquence de 100 Hz en charge et aux régimes symétriques.

A titre d'exemple, on peut signaler les normes établies dans l'usine « Elektrossila » pour les valeurs admissibles

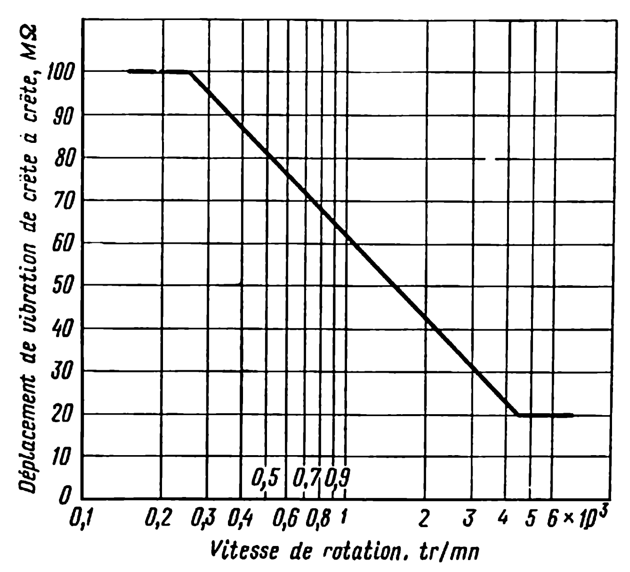


Fig. 10. Amplitudes crête à crête maximales admissibles des déplacements vibratoires des supports des machines électriques lors des essais en plate-forme

des amplitudes crête à crête des vibrations polyharmoniques des paliers de machines électriques à courant continu et à courant alternatif, ainsi que de groupes de machines, à l'exception des turbo-alternateurs (fig. 10). Ces normes sont à appliquer au cours des essais de réception des machines dans les ateliers de montage. Elles sont valables pour tous les régimes de fonctionnement prévus pour une machine donnée.

En cas de fabrication d'une machine dont la vitesse de rotation sort des limites prévues par ces normes, ainsi que

dans le cas où la machine doit satisfaire à des exigences plus sévères, on établit en usine des normes de déplacement vibratoire admissible pour ce cas particulier.

ANNEXE 13

Vérification du positionnement correct et alignement des arbres

A. Généralités

Les machines accouplées ne peuvent fonctionner normalement que si les lignes de flexion élastique de leurs arbres constituent le prolongement l'une de l'autre, sans désaxement ni défaut d'alignement dans le plan d'accouplement. L'opération de montage des arbres conformément

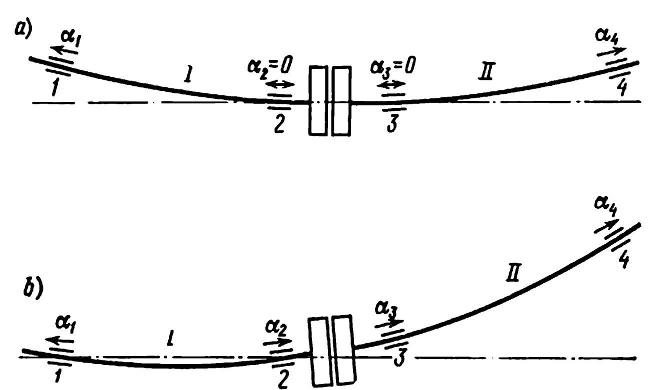


Fig. 1. Divers procédés de positionnement des arbres d'un groupe à deux machines

à cette exigence est désignée en pratique sous le nom d'alignement des arbres.

La flexion naturelle des arbres exige de les installer sous un certain angle par rapport à l'horizon.

Les arbres peuvent être installés par deux procédés différents. D'après le premier procédé, les paliers doivent être montés de manière que les tourillons des arbres soient horizontaux des deux côtés du manchon d'accouplement (fig. 1, *a*) et qu'un niveau à bulle d'air placé sur les tourillons *2* et *3* des arbres *I* et *II* donne une indication zéro,

c'est-à-dire que $\alpha_2 = \alpha_3 = 0$. Dans ce cas, les tourillons *1* et *4* formeront un certain angle avec la ligne horizontale, dont la valeur dépendra de la nature de la ligne de flexion élastique des arbres.

Suivant le deuxième procédé, l'arbre *I* de l'une des machines est monté horizontalement (fig. 1, *b*). Dans ce dernier cas, un niveau placé sur les tourillons *1* et *2* de cet arbre donne des indications (α_1 et α_2) égales en valeur mais de signes contraires, et un niveau placé sur le tourillon *3* doit donner les mêmes indications que celles obtenues sur le tourillon *2*, c'est-à-dire $\alpha_2 = \alpha_3$; le tourillon *4* présente une pente. Si l'élévation de cette extrémité de l'arbre est importante, la composante horizontale due au poids du rotor de la machine II exercera, lors du fonctionnement du groupe, un effort de pression sur le palier de la machine I. Vu cet inconvénient, l'alignement des arbres est généralement effectué d'après le premier procédé.

En réglant la position des lignes d'arbres des groupes à plusieurs machines, on cherche généralement à obtenir, autant que possible, une pente égale des paliers de ce groupe et l'on dispose horizontalement le rotor le plus lourd du groupe.

La pente du tourillon de l'arbre est mesurée avec un niveau à bulle d'air pour quatre positions de l'arbre, en le faisant tourner chaque fois de 90°. On fait deux mesures dans chaque position, en tournant de 180° le niveau à bulle d'air pour la deuxième mesure. Pour la valeur de la pente on prend la moyenne arithmétique de huit indications. Une telle détermination de la pente des tourillons des arbres est nécessaire pour éviter une erreur qui peut apparaître à cause d'un gauchissement de l'arbre du rotor ou d'un écart que l'axe du tourillon peut présenter par rapport à l'axe de rotation (de tels défauts peuvent se manifester par des variations considérables des indications du niveau à bulle d'air placé sur le tourillon de l'arbre pour les différentes positions du rotor).

Pour pouvoir vérifier l'alignement correct des arbres d'un groupe en service, il est nécessaire d'enlever les chapeaux de tous les paliers et de vérifier, à l'aide d'un niveau à bulle d'air, les pentes de tous les tourillons des arbres. La valeur d'une division des niveaux à bulle d'air utilisés à cet effet correspond généralement à une pente de 0,1 mm sur 1 m. Si les pentes mesurées n'ont pas varié par rapport

à celles inscrites sur la fiche de montage, c'est l'indice que l'alignement correct des arbres s'est conservé. Au contraire, si l'on constate des différences en valeur ou en signes des pentes mesurées il faut vérifier l'alignement des arbres du groupe. Si cette vérification montre que l'alignement reste correct malgré la variation des pentes des tourillons, c'est l'indice d'un affaissement non uniforme des socles des machines.

Les méthodes à choisir pour la vérification de l'alignement varient suivant que les rotors sont à deux supports, c'est-à-dire tournent dans deux paliers, ou à un seul support (un bout d'arbre tourne dans le palier et l'autre est relié à une autre machine au moyen d'un accouplement rigide).

B. Vérification de l'alignement des rotors à deux supports

1. Vérification de l'alignement à l'aide d'une paire de calibres mâchoires. La vérification de l'alignement des rotors à l'aide de calibres mâchoires (trusquins) est fondée sur ce qui suit.

Si, sur chacun des plateaux des rotors à accoupler, on fixe des trusquins (fig. 2), dont chacun possède deux pointes,

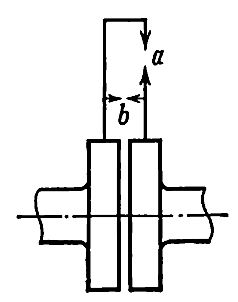



Fig. 2. Installation des trusquins sur les plateaux du manchon d'accouplement

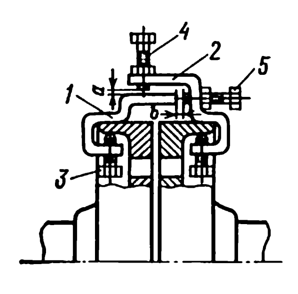


Fig. 3. Dispositif pour l'alignement fixé sur les jantes des plateaux

l'une étant dirigée horizontalement et l'autre verticalement, la rotation de chacun des arbres fera décrire aux pointes de chaque trusquin des circonférences perpendiculaires à l'axe de rotation de l'arbre portant le trusquin fixé. Dans le cas où, les pointes des trusquins correspondants

sont installées l'une en regard de l'autre et l'on assure une rotation simultanée des arbres, les valeurs des jeux radiaux *a* et des jeux axiaux *b* entre les pointes des trusquins ne seront déterminées que par la position relative des axes de rotation et ne dépendront ni de la précision d'usinage des surfaces cylindriques et des faces terminales des plateaux, ni du gauchissement des arbres, en supposant bien sûr que les rotors ne subissent aucun déplacement axial au cours de leur rotation. La position relative des axes de rotation des deux arbres peut être déterminée à partir des mesures des jeux radiaux et axiaux indiqués plus haut pour quatre positions du rotor (en cas de leur rotation simultanée), décalées de 90° l'une par rapport à l'autre.

Quand l'alignement des arbres est correct, tous les jeux *a* et tous les jeux *b* (fig. 2) seront égaux entre eux pour chacune des quatre positions du rotor (pour les écarts admissibles, voir p. 4 du présent sous-chapitre 4).

Pour mesurer les jeux radiaux et axiaux on se sert de dispositifs de diverses constructions qu'on fixe sur les plateaux ou sur les arbres près des manchons d'accouplement. La fig. 3 représente un tel dispositif destiné à l'alignement des arbres et constitué par deux étriers en acier *1* et *2* fixés au moyen de boulons *3* sur les plateaux d'un groupe à aligner après son installation définitive. Les étriers sont placés l'un en face de l'autre, de manière à pouvoir mesurer à la fois les jeux radiaux *a* et les jeux axiaux *b* pour les différentes positions du rotor, en utilisant pour ces mesures un jeu de cales d'épaisseur.

Pour les mesures et le réglage de la valeur de ces jeux lors de l'installation des étriers on utilise les boulons *4* et *5* munis de contre-écrous.

Tous ces dispositifs doivent avoir une rigidité suffisante pour qu'ils ne s'incurvent lors des mesures à l'aide de cales d'épaisseur, ni sous l'effet de leur propre poids. Pour améliorer la précision de mesure des jeux on peut installer, au lieu des boulons de mesure, des comparateurs (fig. 4, *a*) ou des têtes micrométriques (fig. 4, *b*), en les vissant sur les étriers.

Avant d'installer les dispositifs destinés à l'alignement des arbres il est nécessaire de disjoindre les plateaux d'accouplement, de retirer tous les boulons et d'écarter légèrement les rotors de manière que les plateaux du manchon ne soient pas en contact. Puis, on vérifie une rotation libre

de chacun des rotors et on s'assure de l'absence de tout frottement, par exemple dans les dispositifs d'étanchéité des flasques de la machine ; on s'assure également que le rotor présente un jeu axial.

Pour empêcher les déplacements axiaux des rotors il faut installer des butées sûres dans les gorges ou les faces terminales des arbres. Les rotors sont installés de manière à amener en coïncidence les traits de repère portés sur les deux plateaux du manchon ; le dispositif d'alignement est monté de façon à permettre les mesures des jeux avec un minimum de cales d'épaisseur. Dans ces conditions les

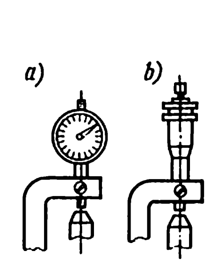


Fig. 4. Mesure des jeux:
a: à l'aide d'un comparateur;
b: à l'aide d'une tête micrométrique

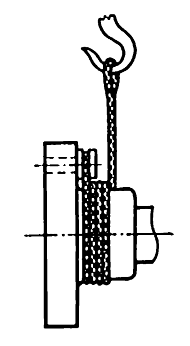


Fig. 5. Rotation d'un rotor à l'aide d'une grue

mesures sont plus précises. Il est désirable que les jeux initiaux ne dépassent pas 2 à 3 mm. L'étrier extérieur est à monter sur le plateau de la machine vérifiée. Après le montage des dispositifs il est nécessaire de s'assurer de leur bonne fixation. Au cours des mesures, il faut vérifier périodiquement que les étriers ne sont pas en contact avec une partie quelconque de la machine ; il convient aussi d'éviter de toucher les étriers avec les mains.

Pour déterminer les jeux radiaux et axiaux on tourne les deux rotors à la fois, à partir de la position de départ (0°), de 90°, 180° et 270° dans le sens de rotation du moteur d'entraînement ou du mécanisme entraîné et l'on mesure les jeux à l'aide de cales d'épaisseur pour chacune de ces quatre positions, les traits de repère étant amenés en coïncidence.

Lors des mesures, les cales d'épaisseur doivent être introduites dans les jeux avec un léger effort. Pour que les mesures soient plus précises, il faut qu'elles soient effectuées par un même opérateur.

Les rotors légers peuvent être tournés à la main ou au moyen d'un levier, alors que pour la rotation des rotors lourds on doit avoir recours à une grue. Dans ce dernier cas, on introduit un axe dans l'un des orifices du plateau (fig. 5) et on fixe à cet axe l'une des extrémités de l'élingue, en l'enroulant plusieurs fois autour du moyeu du plateau. La deuxième extrémité de l'élingue, terminée par une boucle, est mise sur le crochet de la grue. Avant chaque mesure, la tension de l'élingue doit être affaiblie.

Les résultats des mesures des jeux axiaux et radiaux sont à inscrire comme il est indiqué sur la fig. 6, *a* ou, d'une manière simplifiée, sur la fig. 6, *b*, dans lesquelles a_1, a_2, a_3, a_4 et b_1, b_2, b_3 et b_4 désignent respectivement les jeux radiaux et axiaux pour les angles de rotation de l'arbre égaux à 0°, 90°, 180° et 270°. Un tel ordre d'inscription est choisi conventionnellement, si l'on regarde la face du plateau de la machine à aligner du côté de la machine installée.

Les mesures des jeux ont été effectuées correctement si les égalités suivantes sont vérifiées :

$$a_1 + a_3 = a_2 + a_4;$$

$$b_1 + b_3 = b_2 + b_4,$$

c'est-à-dire si la somme des jeux radiaux et la somme des jeux axiaux mesurés suivant deux diamètres perpendiculaires entre eux, est la même. En outre, pour contrôler la justesse des mesures il convient, après avoir effectué quatre paires de mesures, de remettre les rotors dans leurs positions de départ (0°) ; les mesures faites dans cette position doivent donner les mêmes résultats que ceux obtenus lors de la première mesure.

Les causes des mesures incorrectes peuvent être : une rigidité insuffisante des dispositifs utilisés pour l'alignement, des efforts inégaux avec lesquels les cales d'épaisseur sont introduites dans les jeux, un déplacement axial des rotors au cours des mesures. Dans le cas où les écarts détectés par ces vérifications sont importants (supérieurs à

0,02 mm), il faut en rechercher et éliminer les causes et reprendre ensuite toutes les mesures.

Si la mesure des jeux (a_3 et b_3) pour la position basse du dispositif d'alignement s'avère impossible à réaliser, on effectue les mesures pour trois positions des étriers et on calcule les jeux radial et axial dans cette position à l'aide des expressions:

$$a_3 = (a_2 + a_4) - a_1;$$
$$b_3 = (b_2 + b_4) - b_1.$$

Les valeurs des déplacements qu'on doit assurer aux paliers de la machine à aligner sont calculées à partir des mesures des jeux axiaux et radiaux d'après les formules:

$$y_1 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} \cdot \frac{l_1}{r}; \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} \cdot \frac{l_2}{r}; \quad (2)$$

$$x_1 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2} \cdot \frac{l_1}{r}; \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2} \cdot \frac{l_2}{r}, \quad (4)$$

dans lesquelles x_1 et y_1 sont les déplacements horizontal et vertical du palier le plus proche du manchon d'accouplement; x_2 et y_2, les déplacements horizontal et vertical du deuxième palier.

Les valeurs positives de x_1 et x_2 correspondent au déplacement vers la droite et les valeurs négatives au déplacement vers la gauche; les valeurs positives de y_1 et y_2 correspondent au déplacement vers le haut et les valeurs négatives au déplacement vers le bas. Tous ces sens des déplacements ne sont valables que dans le cas où les mesures ont été effectuées et leurs résultats ont été enregistrés en réalisant les conditions suivantes:

a) la disposition des symboles littéraux sur la fig. 6 correspond à la face frontale du plateau de la machine à aligner si l'on regarde cette face du côté de la machine définitivement installée;

b) l'étrier enveloppant est monté sur le plateau de la machine définitivement installée;

c) les lectures de a_1 et b_1 se trouvent en haut et celles de b_2 sont à droite indépendamment du sens adopté pour la rotation du rotor au cours de l'alignement.

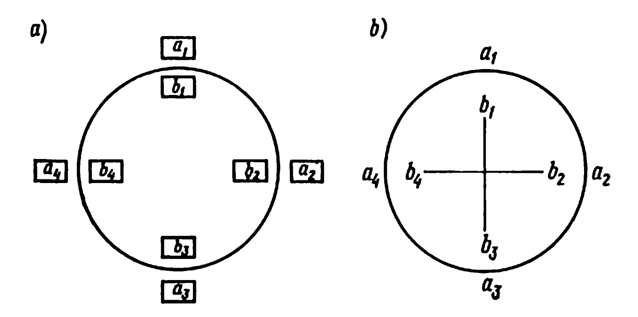


Fig. 6. Enregistrement des résultats des mesures lors de l'alignement des rotors à l'aide d'une seule paire d'étriers

Dans les formules (1) à (4):
l_1 est la distance entre le milieu du palier *1* et la face frontale du plateau (fig. 7, *a*); l_2 la distance entre le milieu

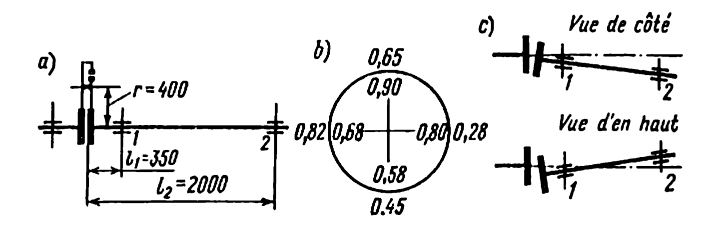


Fig. 7. Exemple d'alignement des rotors à l'aide d'une seule paire d'étriers

du palier *2* et la face frontale du plateau; *r* le rayon de l'étrier, rapporté au point de mesure du jeu axial.

Exemple d'application. Soit une machine à aligner dont les dimensions de l'arbre et de l'étrier servant à la mesure des jeux axiaux sont indiquées sur la fig. 7, *a*, c'est-à-dire l_1 = 350 mm, l_2 = 2000 mm, r = 400 mm. Les mesures des jeux radiaux et axiaux ont donné des résultats indiqués sur la fig. 7, *b*, ce qui correspond à la disposition des arbres

montrée sur la fig. 7, *c*; l'étrier extérieur est monté sur le plateau de la machine vérifiée.

En utilisant les formules (1) à (4) nous obtenons:

$$y_1 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} \cdot \frac{l_1}{r} =$$
$$= \frac{0,65 - 0,45}{2} + \frac{0,90 - 0,58}{2} \cdot \frac{350}{400} = 0,24 \text{ mm};$$
$$y_2 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} \cdot \frac{l_2}{r} =$$
$$= \frac{0,65 - 0,45}{2} + \frac{0,90 - 0,58}{2} \cdot \frac{2000}{400} = 0,90 \text{ mm};$$
$$x_1 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2} \cdot \frac{l_1}{r} =$$
$$= \frac{0,28 - 0,82}{2} + \frac{0,80 - 0,68}{2} \cdot \frac{350}{400} = -0,22 \text{ mm};$$
$$x_2 = \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_2 - b_4}{2} \cdot \frac{l_2}{r} =$$
$$= \frac{0,28 - 0,82}{2} + \frac{0,80 - 0,68}{2} \cdot \frac{2000}{400} = 0,03 \text{ mm}.$$

Les résultats de ces calculs signalent que le palier *1* doit être surélevé de 0,24 mm et déplacé de 0,22 mm vers la gauche (le signe « — ») alors que le palier *2* doit être surélevé de 0,90 mm et déplacé de 0,03 mm vers la droite.

2. Vérification de l'alignement à l'aide de deux paires de calibres mâchoires. En vérifiant l'alignement correct à l'aide d'une seule paire d'étriers il est nécessaire, comme il a été dit plus haut, de prévenir des déplacements axiaux des arbres qui peuvent introduire des erreurs dans les résultats des mesures. Pour éviter l'influence due aux déplacements axiaux des rotors, on peut procéder à l'alignement des arbres au moyen de deux paires d'étriers (fig. 8) décalées de 180° l'une par rapport à l'autre.

L'une des paires d'étriers est utilisée pour la mesure des jeux radiaux et axiaux alors que la deuxième paire ne sert qu'à la mesure des jeux axiaux. Les deux paires d'étriers ne doivent mesurer les jeux axiaux que pour le même rayon.

La mesure des jeux d'après ce procédé se fait également en tournant les deux rotors à la fois de 0°, 90°, 180° et 270°. Pour chaque position des rotors on mesure un jeu radial et deux jeux axiaux. La méthode à appliquer est la même

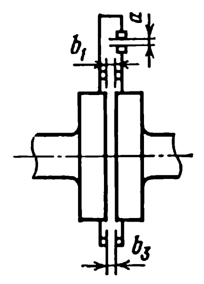


Fig. 8. Schéma d'installation de deux paires d'étriers pour l'alignement des rotors

que lors de l'alignement à l'aide d'une seule paire d'étriers.

Les résultats des mesures sont à enregistrer comme il est montré sur la fig. 9. A partir de ces données des mesures on détermine les jeux axiaux résultants en quatre points de la circonférence. Pour jeu axial résultant on prend la demi-somme des jeux mesurés au point donné pour une position de l'étrier et pour sa position après la rotation de 180°, c'est-à-dire :

$$b_1 = \frac{b_1^{I} + b_1^{III}}{2}; \quad b_2 = \frac{b_2^{II} + b_2^{IV}}{2};$$

$$b_3 = \frac{b_3^{I} + b_3^{III}}{2}; \quad b_4 = \frac{b_4^{II} + b_4^{IV}}{2}.$$

Un tel procédé utilisé pour la détermination des jeux résultants permet d'exclure l'influence due à une valeur inégale des jeux axiaux des deux paires d'étriers lors de leur fixation ainsi qu'à des déplacements axiaux des rotors qui peuvent se produire lors de leur rotation. Cela s'explique par ce que ces valeurs rentrent dans les jeux résultants en chaque point sous forme de valeurs constantes qui s'annulent parce qu'on prend, pour déterminer la ligne de gauchissement des arbres, les différences des jeux résultants.

En partant des jeux résultants mesurés, on détermine les

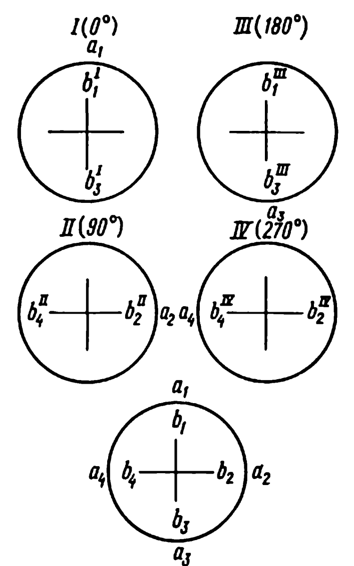
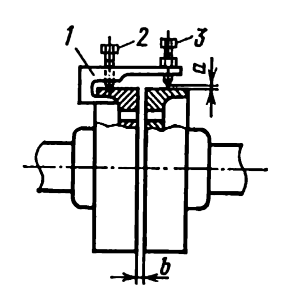


Fig. 9. Enregistrement des résultats des mesures lors de l'alignement des rotors à l'aide de deux paires d'étriers

Fig. 10. Etrier pour l'alignement des rotors d'après les plateaux du manchon d'accouplement



déplacements nécessaires à imprimer aux paliers, en utilisant à cet effet les formules (1) à (4) et en y portant au lieu de b_1, b_2, b_3 et b_4 les valeurs des jeux axiaux résultants.

3. Vérification de l'alignement d'après les plateaux du manchon. Pour vérifier l'alignement d'après ce procédé on utilise pour la mesure des jeux axiaux un étrier dont l'une des constructions possibles est représentée par la fig. 10. L'étrier *1* est fixé au moyen du boulon *2* sur le plateau du rotor de la machine définitivement installé. Dans cet étrier on visse un boulon *3* de mesure avec contre-écrou. Les jeux radiaux a se mesurent à l'aide de cales d'épaisseur introduites entre le boulon de mesure et la circonférence extérieure du plateau. Dans ce procédé, le boulon de mesure peut être remplacé par un comparateur. Les jeux axiaux sont à mesurer à l'aide de cales d'épaisseur introduites entre les faces frontales des plateaux du manchon. Signalons que dans certaines constructions de manchons d'accouplement on prévoit des endroits de contrôle spécialement usinés sur la surface cylindrique et sur les faces frontales des plateaux.

Si la distance entre les faces frontales des plateaux est

Fig. 11. Enregistrement des résultats des mesures lors de l'alignement des rotors d'après les plateaux

Données résultantes

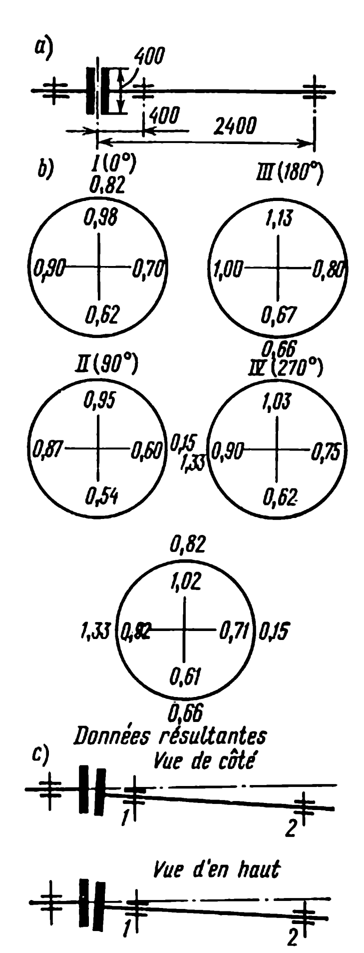


Fig. 12. Exemple d'alignement des rotors d'après les plateaux du manchon d'accouplement

supérieure à celle qu'on peut mesurer avec le jeu de cales d'épaisseur disponible, on peut employer pour la mesure des jeux axiaux une plaquette calibrée en association avec des cales d'épaisseur. Les jeux sont mesurés, tout comme dans les procédés précédents, pour quatre positions des deux rotors (0°, 90°, 180° et 270°). Dans chacune de ces positions on mesure un jeu radial et un jeu axial.

Les jeux axiaux sont à mesurer pour chaque position des plateaux du manchon en quatre points, aux extrémités de deux diamètres perpendiculaires; les résultats des mesures sont à enregistrer comme il est indiqué sur la fig. 11. A partir des ces enregistrements, on détermine les jeux résultants, pour lesquels on prend la valeur moyenne du jeu au point donné, c'est-à-dire:

$$b_1 = \frac{b_1^{I} + b_1^{II} + b_1^{III} + b_1^{IV}}{4}; \quad b_2 = \frac{b_2^{I} + b_2^{II} + b_2^{III} + b_2^{IV}}{4};$$

$$b_3 = \frac{b_3^{I} + b_3^{II} + b_3^{III} + b_3^{IV}}{4}; \quad b_4 = \frac{b_4^{I} + b_4^{II} + b_4^{III} + b_4^{IV}}{4}.$$

Dans la méthode considérée, les déplacements axiaux des rotors qui peuvent se produire au cours de l'alignement sont évidemment sans effet sur les résultats de l'alignement.

Comme il a été dit plus haut, le critère pour juger de la justesse des mesures est que la somme des jeux axiaux sui-

vant le diamètre horizontal doit être égale à la somme des mêmes jeux suivant le diamètre vertical. Ce critère est également valable pour les jeux résultants, tant axiaux que radiaux.

Dans le cas où les mesures en un point quelconque ne peuvent pas être effectuées par cette méthode, on peut, comme il a été indiqué plus haut, faire les mesures en trois points et déterminer par calcul les jeux au quatrième point.

Pour déterminer les déplacements à donner aux paliers, on utilise les formules (1) à (4) en y portant au lieu de b_1, b_2, b_3 et b_4 les valeurs des jeux résultants.

Exemple d'application. Soient les distances l_1 et l_2 (fig. 12, *a*) respectivement égales à 400 mm et 2400 mm, le diamètre du manchon d'accouplement est de 400 mm, c'est-à-dire $r = 200$ mm; les résultats des mesures des jeux radiaux et axiaux sont ceux indiqués sur la fig. 12, *b*. On demande de calculer les déplacements à donner aux paliers pour obtenir un alignement correct des rotors.

Déterminons les jeux axiaux résultants:

$$b_1 = \frac{b_1^{I} + b_1^{II} + b_1^{III} + b_1^{IV}}{4} = \frac{0,98 + 0,95 + 1,13 + 1,03}{4} = 1,02 \text{ mm};$$

$$b_2 = \frac{b_2^{I} + b_2^{II} + b_2^{III} + b_2^{IV}}{4} = \frac{0,70 + 0,60 + 0,80 + 0,75}{4} = 0,71 \text{ mm};$$

$$b_3 = \frac{b_3^{I} + b_3^{II} + b_3^{III} + b_3^{IV}}{4} = \frac{0,62 + 0,54 + 0,67 + 0,62}{4} = 0,61 \text{ mm};$$

$$b_4 = \frac{b_4^{I} + b_4^{II} + b_4^{III} + b_4^{IV}}{4} = \frac{0,90 + 0,87 + 1,00 + 0,90}{4} = 0,92 \text{ mm}.$$

Les jeux résultants, axiaux et radiaux, sont montrés en bas de la fig. 12, *b*. Les déplacements nécessaires des paliers se calculent à l'aide des formules (1) à (4), en utilisant les données résultantes.

Déplacement vertical du palier *1*:

$$y_1 = \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} \cdot \frac{l_1}{r} = \frac{0,82 - 0,66}{2} + \frac{1,02 - 0,61}{2} \cdot \frac{400}{200} = 0,49 \text{ mm}.$$

Déplacement horizontal du palier *1*:

$$x_1=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\cdot\frac{l_1}{r}=\frac{0,15-1,33}{2}+$$

$$+\frac{0,71-0,92}{2}\cdot\frac{400}{200}=-0,80\ \text{mm}.$$

Déplacement vertical du palier *2*:

$$y_2=\frac{a_1-a_3}{2}+\frac{b_1-b_3}{2}\cdot\frac{l_2}{r}=\frac{0,82-0,66}{2}+$$

$$+\frac{1,02-0,61}{2}\cdot\frac{2400}{200}=2,54\ \text{mm}.$$

Déplacement horizontal du palier *2*:

$$x_2=\frac{a_2-a_4}{2}+\frac{b_2-b_4}{2}\cdot\frac{l_2}{r}=\frac{0,15-1,33}{2}+$$

$$+\frac{0,71-0,92}{2}\cdot\frac{2400}{200}=-1,85\ \text{mm}.$$

Ainsi, le palier *1* doit être surélevé de 0,49 mm et déplacé de 0,80 mm vers la gauche, tandis que le palier *2* doit être surélevé de 2,54 mm et déplacé de 1,85 mm vers la gauche. La position réelle des arbres est représentée par la fig. 12, *c*. Il est facile de voir qu'en prenant pour les jeux résultants ceux obtenus pour les positions de 0° et 180° ou pour les positions de 90° et 270°, on obtient les mêmes valeurs des déplacements à donner aux paliers.

4. Tolérances d'alignement. Lorsque l'alignement est effectué à l'aide des étriers, les valeurs des jeux radiaux ainsi que celles des jeux axiaux mesurés après la rotation simultanée des deux rotors de 0°, 90°, 180° et 270° sur un rayon de 250 à 300 mm ne doivent pas différer de plus de 0,03 mm l'une de l'autre. Pour un autre rayon de mesure, les tolérances sur les jeux axiaux doivent être modifiées proportionnellement aux rayons.

Dans le cas de l'alignement d'après les plateaux du manchon les jeux radiaux ainsi que les jeux axiaux ne doivent différer de plus de 0,05 mm les uns des autres, pour les mêmes positions des arbres et des manchons de 400 à 500 mm de diamètre.

Les tolérances d'alignement des turbo-alternateurs d'après les plateaux sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1

Tolérances d'alignement des turbo-alternateurs

Type de manchon d'accouplement	Différence entre les valeurs moyennes des jeux, mm		Observations
	suivant la circonférence (jeux radiaux)	suivant la face frontale (jeux axiaux, rapportés au diamètre de 1 m)	
rigide	0,04	0,05	Les tolérances admises sont à concorder avec les prescriptions du constructeur de la turbine
semi-élastique . .	0,06	0,06	
à ressorts	0,06	0,06	
à griffes	0,08	0,08	

C. Vérification de l'alignement des rotors à un seul support

Pour vérifier si l'alignement des rotors à un seul support est correct, on procède comme suit.

En utilisant une élingue comportant un tendeur à vis *2* (fig. 13), on suspend l'extrémité du rotor *1* à un seul sup-

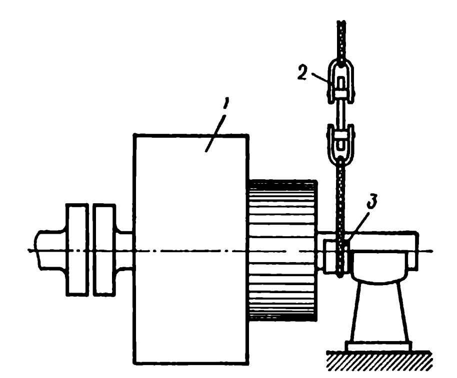


Fig. 13. Vérification de l'alignement correct d'un rotor à un seul support

port se trouvant près du palier après avoir interposé sous l'élingue une feuille *3* courbée en laiton (ou en cuivre) enduite d'huile pour cylindres. On place sur le tourillon

de l'arbre deux comparateurs: l'un dans un plan vertical et l'autre dans un plan horizontal, en les fixant sur le palier; et on note, avant de tendre l'élingue, l'indication du comparateur installé dans le plan vertical. Puis, on soulève le bout d'arbre autant qu'on puisse retirer le coussinet inférieur. Après cela on fait descendre le bout d'arbre et on le remet, à l'aide du tendeur à vis, dans la position initiale; le comparateur installé dans le plan vertical doit donner la même indication que précédemment. Après la descente du rotor il est recommandé d'attendre quelques minutes pour que les indications du comparateur s'établissent à un niveau constant. Ensuite, on fait tourner le rotor et on détermine la valeur du battement du bout d'arbre à l'aide du comparateur installé dans le plan horizontal. Le battement ainsi mesuré est comparé avec les données inscrites dans la fiche de montage. Si ces dernières manquent, on peut se conformer à des tolérances suivantes sur le battement du bout d'arbre à suspension libre:

vitesse de rotation, tr/mn . .	jusqu'à 1000	1000 à 1500	1500 à 3000
tolérance de battement, mm .	0,15 à 0,20	0,12 à 0,15,	0,05 à 0,08

Si le battement mesuré est supérieur aux valeurs inscrites dans la fiche de montage ou à celles indiquées ci-dessus, il convient de procéder à la correction de l'alignement.

A cet effet, on démonte les boulons qui bloquent les plateaux du manchon l'un contre l'autre et on écarte des rotors de manière à obtenir un jeu de l'ordre de 1 à 2 mm entre les faces frontales des plateaux, mais le collet de l'un des plateaux doit se trouver dans la gorge du deuxième. Dans ces conditions, le rotor à aligner prend appui, par un bout, sur son propre palier et, par l'autre bout, sur le collet du plateau. On réunit les deux plateaux par 2 ou 3 boulons ou goujons ayant un diamètre légèrement inférieur à celui des boulons du manchon. Cela est nécessaire premièrement pour empêcher la sortie du rotor de l'alésage du plateau et, deuxièmement, pour permettre aux rotors de légers déplacements.

Pour éviter tout accident possible, on met sous le bout libre de l'arbre du rotor un support solide, en ménageant un certain jeu entre l'arbre et ce support. Ces préparatifs étant terminés, on effectue l'alignement suivant les plateaux en procédant de la même manière que dans le cas d'un

rotor à deux supports décrit plus haut, à cette différence près que dans ce dernier cas on mesure seulement les jeux axiaux (sans jeux radiaux). La conjugaison du collet et de la gorge des plateaux est à réaliser avec un ajustement glissant. Quant à la différence entre les diamètres du collet et de la gorge elle est du même ordre de grandeur que celui des tolérances sur les jeux radiaux admises pour l'alignement.

D'après les jeux axiaux déterminés par les mesures, on calcule les déplacements nécessaires à donner au palier du rotor à aligner, en utilisant à cet effet les mêmes formules que pour l'alignement des rotors à deux supports. En calculant le déplacement du palier dans le plan vertical, on peut introduire dans la formule une correction tenant compte du fait que le palier peut être installé plus haut, d'une quantité égale à la moitié de la différence entre les diamètres de la gorge et du collet.

Les tolérances d'alignement à admettre dans ce cas peuvent être prises les mêmes que pour les rotors à deux supports (voir annexe 13, B-4). Après avoir réglé les jeux axiaux, on relie les deux plateaux du manchon en mettant le nombre complet de boulons ou de goujons temporaires, et on vérifie le battement du bout libre du rotor en procédant comme il a été indiqué plus haut.

Si la valeur du battement dépasse les tolérances admises, il faut en rechercher la cause. Les principales causes de battement excessif du bout d'arbre peuvent être: un serrage inégal des boulons, un mauvais usinage des faces formant joint des plateaux du manchon (défaut de perpendicularité de ces faces par rapport aux axes de rotation), des traces de matage sur les faces frontales des plateaux et, enfin, un gauchissement des arbres. On recherche la cause qui a provoqué le battement de l'arbre en appliquant la méthode des exclusions successives. Tout d'abord, on détermine le plan de battement et on vérifie le serrage uniforme des boulons. La connaissance du plan de battement permet de déterminer les boulons à resserrer. Pour le resserrage des boulons, il convient de desserrer légèrement les boulons diamétralement opposés tout en se gardant de compromettre la solidité de l'assemblage. Si le resserrage des boulons ne permet pas d'obtenir une réduction voulue du battement, il convient de vérifier si les faces frontales des plateaux du manchon ne portent pas de traces de coup et ne sont pas encrassées.

Si cette cause est exclue elle aussi, le battement peut provenir d'un défaut de perpendicularité des faces frontales des plateaux (battement des faces) par rapport aux axes de rotation (fig. 14, *a*) ou du gauchissement de l'un des arbres (fig. 14, *b* et *c*).

Pour exclure cette dernière cause il convient de vérifier le battement de chacun des arbres. A cet effet, on place de nouveau sur le coussinet du palier le bout d'arbre opposé au manchon d'accouplement, on retire les boulons du manchon et on les remplace par quelques boulons d'un plus

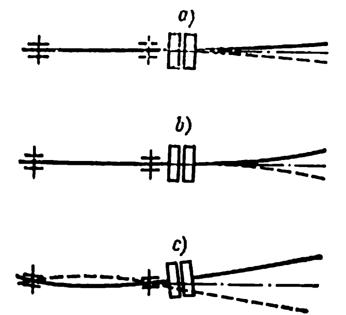


Fig. 14. Battement de l'arbre d'un rotor à un seul support dû: *a*) au battement des faces frontales des plateaux; *b*) au gauchissement de l'arbre d'un rotor à un seul support; *c*) au gauchissement de l'arbre d'un rotor à deux supports

petit diamètre; on laisse entre les faces frontales des plateaux un jeu de l'ordre de 1 à 2 mm. Un tel assemblage des plateaux permet aux arbres de légers déplacements si bien que le battement de l'arbre à vérifier ne sera pas transmis à l'arbre à deux supports.

On détermine le battement de chacun des arbres à l'aide d'un comparateur, en le plaçant sur le tourillon de l'arbre ou sur des endroits rectifiés près des tourillons. Si le battement de chacun des arbres est dans les limites des tolérances (voir annexe 12), il ne reste qu'une cause pouvant provoquer le battement du bout d'arbre du rotor à suspension flottante qui est le battement (voilement) des faces frontales des plateaux du manchon. A un tel défaut on peut remédier soit par tournage (si c'est possible), soit par grattage des faces frontales des plateaux; la pose des joints entre les faces des plateaux est à éviter.

L'alignement des arbres à l'aide de la méthode considérée se termine par la vérification du battement du bout d'arbre du rotor à un seul support, les plateaux du manchon étant assemblés au moyen de boulons ou goujons temporaires. Si le battement ne dépasse pas les tolérances, on monte

et serre les boulons permanents et on procède à une vérification définitive du battement.

La méthode d'alignement que nous venons de décrire et qui consiste à assembler les plateaux du manchon seulement après avoir obtenu un parallélisme de leurs faces formant joint, correspond à la valeur nulle du moment de flexion dans le plan du joint des plateaux. Pourtant un tel alignement entraîne dans certains cas une surcharge des uns des paliers et une sous-charge des autres. Une répartition plus regulière des charges sur les paliers du groupe peut être obtenue en appliquant une autre méthode d'alignement lorsqu'on assure, avant le blocage des plateaux, une certaine ouverture vers le bas de leurs faces frontales, pour les mêmes jeux axiaux dans le plan horizontal. Dans les

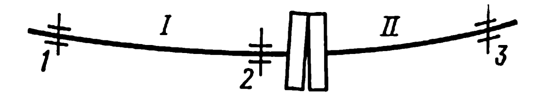


Fig. 15. Accouplement d'un rotor à deux supports et d'un rotor à un seul support avec une ouverture vers le bas des plateaux du manchon

grosses machines la valeur de cette ouverture dépasse souvent les tolérances d'alignement et atteint quelques fractions de millimètre.

Proposons-nous d'étudier l'influence exercée par l'ouverture des plateaux sur la répartition des charges entre les paliers d'un groupe de machines.

L'arbre du rotor *I* à deux supports (fig. 15) présente, lorsqu'il n'est pas accouplé au rotor *II* à un seul support, une certaine flèche ; un niveau à bulle d'air placé sur les tourillons de l'arbre près des paliers *1* et *2* indique certaines pentes. Si le rotor *II*, aligné d'après la première méthode, est relié au moyen d'un accouplement rigide au rotor *I*, la ligne de flexion élastique du rotor *I* sera modifiée sous l'effet du poids du rotor *II* et la charge sur le bout en porte-à-faux de l'arbre dans le palier et par conséquent sur le palier *2* lui-même augmentera, alors que la charge sur le palier *1* diminuera. L'augmentation de la charge sur le palier *2* sera plus importante que la diminution de la charge sur le palier *1*. Dans le cas où, en effectuant l'alignement des arbres d'après la deuxième méthode, on assure une ouverture vers le bas des faces frontales des plateaux, le serrage

des boulons du manchon fera naître un moment de flexion dans le plan du joint. Il en résultera la disparition de l'ouverture et une diminution de la réaction d'appui du palier *2* aux dépens des paliers *1* et *3*, ce qui signifie que la répartition des charges entre les paliers dépendra de la valeur de l'ouverture.

C'est ainsi qu'en réglant l'ouverture à une valeur convenable, on peut obtenir une répartition plus uniforme des charges entre tous les paliers des machines faisant partie du groupe.

Dans le cas où la valeur nécessaire de l'ouverture des plateaux est connue, on assure, lors de l'alignement, des jeux axiaux égaux suivant le diamètre horizontal et des

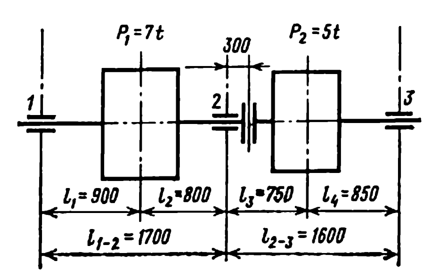


Fig. 16. Exemple de calcul des charges sur les paliers d'un groupe à deux machines

jeux axiaux correspondants suivant le diamètre vertical. Pour le reste, la vérification et la correction de l'alignement sont à effectuer comme il est décrit plus haut.

Comparons en utilisant un exemple concret les charges sur les paliers d'un groupe à deux machines après l'alignement d'un rotor à un seul support par des méthodes considérées plus haut. Les distances entre les axes des paliers et les rotors nécessaires à la détermination des charges, ainsi que les masses des rotors sont indiquées sur la fig. 16.

Les charges maximales admissibles (d'après les données du constructeur) sont: pour le palier *1* — 39 kN, pour le palier *2* — 66 kN et pour le palier *3* — 23,5 kN.

Etant donné qu'avec la première méthode d'alignement le moment de flexion dans le plan du joint des plateaux du manchon $M_{f1} = 0$, on détermine les charges sur les paliers, en remplaçant le système statiquement indéterminable d'un arbre à trois supports par le système statiquement déterminable de deux arbres à deux supports: palier *1* — 27,2 kN, palier *2* — 75,5 kN et palier *3* — 17,3 kN,

en posant dans les calculs approximativement : 1 tf $\approx$ $\approx$ 10 kN (kilonewtons).

On voit que le palier médian est surchargé alors que les deux paliers extrêmes sont sous-chargés.

En prenant $M_{f1} = 0$ dans le plan transversal axial du 2-ième palier, on peut déterminer par le même procédé les charges sur les paliers dues à l'action de l'arbre aligné par la deuxième méthode :

la charge sur le palier *1* provoquée par le rotor P_1 :

$$Q_1 \approx 10\,P_1 \frac{l_2}{l_{1-2}} = 70 \frac{800}{1700} \approx 33 \text{ kN} ;$$

la charge sur le palier *2* provoquée par le rotor P_1 :

$$Q_2' \approx 10P_1 \frac{l_1}{l_{1-2}} = 70 \frac{900}{1700} \approx 37 \text{ kN} ;$$

la charge sur le palier *2* provoquée par le rotor P_2 :

$$Q_2'' \approx 10P_2 \frac{l_4}{l_{2-3}} = 50 \frac{850}{1600} \approx 27 \text{ kN} ;$$

la charge sur le palier *2* provoquée par le poids des deux rotors :

$$Q_2 \approx Q_2' + Q_2'' = 37 + 27 = 64 \text{ kN} ;$$

la charge sur le palier *3* provoquée par le rotor P_2 :

$$Q_3 \approx 10P_2 \frac{l_3}{l_{2-3}} = 50 \frac{750}{1600} \approx 23 \text{ kN}.$$

On voit que dans ce cas les charges sur tous les paliers sont dans les limites admissibles. Le moment de flexion M_{f1} dans le plan du joint des plateaux est ici différent de zéro. Avant de bloquer les plateaux, on doit assurer une ouverture de leurs faces frontales correspondant à la répartition obtenue des charges sur les paliers.

Lors de l'alignement des arbres avec prise en compte du poids des rotors, on installe les arbres comme dans le premier cas ; en le faisant, on cherche à obtenir entre les plateaux aux extrémités du diamètre horizontal, des jeux axiaux identiques, dans les limites des tolérances admises pour

l'alignement des rotors à deux supports. Ensuite, on réunit les plateaux au moyen de boulons ou de goujons temporaires et on suspend au crochet d'une grue le bout du rotor à un seul support, en procédant de la même façon que dans le premier procédé, à cette différence près qu'en plus du tendeur à vis on fixe encore à l'élingue un dynamomètre (si les limites de mesure du dynamomètre sont insuffisantes, on peut l'utiliser en association avec un palan). Puis, on place un comparateur sur le tourillon de l'arbre dans le plan vertical et, en agissant sur le tendeur à vis, on soulève de 0,01 à 0,03 mm le bout d'arbre, en contrôlant cette valeur d'après le comparateur. Dans ce cas, les indications du dynamomètre correspondent approximativement à la réaction d'appui du palier.

Pour obtenir la charge calculée sur le palier du rotor à un seul support, le bout de son arbre doit occuper en hauteur une position pour laquelle le dynamomètre indique la valeur de cette charge. C'est pourquoi, si les indications du dynamomètre sont inférieures à la valeur de calcul, il convient de soulever le bout du rotor jusqu'à ce que les indications du dynamomètre deviennent égales à la valeur calculée. A cet effet, on interpose des cales sous le bâti de palier et on contrôle de nouveau la charge au dynamomètre. Si les indications du dynamomètre sont plus grandes que la valeur calculée de la charge, il convient de retirer quelques cales du bâti de palier ou de réduire leur épaisseur. Après avoir réglé la position du palier en hauteur, on écarte les rotors de 1 à 2 mm et on mesure les jeux axiaux suivant le diamètre vertical; la différence entre les valeurs de ces jeux donne justement la valeur de l'ouverture nécessaire des plateaux. On mesure aussi, à l'aide d'un niveau à bulle d'air, les pentes des tourillons et on inscrit toutes ces données dans les documents techniques correspondants. Après cela, on réunit les plateaux de nouveau au moyen de boulons temporaires et on vérifie le battement du bout du rotor suspendu au crochet de grue, en procédant de la même façon que lors de la vérification de l'alignement d'après la première méthode. Puis, on bloque les plateaux par leurs boulons permanents et on vérifie de nouveau le battement du bout de rotor comme il est indiqué plus haut [1]).

---

[1]) Cette méthode d'alignement des rotors à un seul support est employée au Combinat métallurgique de Magnitogorsk.

ANNEXE 14

Suppression des vibrations excessives

A. Notions fondamentales et définitions

On appelle *oscillations mécaniques* ou *vibrations* l'alternance des croissances et des décroissances du déplacement d'un point d'un système mécanique, par exemple d'une machine ou d'une machine-outil. On appelle déplacement, vitesse et accélération d'un corps vibrant les valeurs instantanées de ces grandeurs.

La vibration est provoquée par une *force dite perturbatrice* dont l'apparition peut être due à diverses causes de nature mécanique ou électromagnétique (voir § 44).

Le fonctionnement d'une machine s'accompagne généralement d'une vibration périodique au cours de laquelle les valeurs déterminées du déplacement vibratoire, de la vitesse vibratoire et de l'accélération vibratoire se succèdent à des intervalles de temps égaux et dans le même ordre.

La *fréquence f* des oscillations périodiques (fig. 1), c'est-à-dire le nombre de cycles complets de ces oscillations en une seconde est mesurée en *hertz*:

$$f = \frac{1}{T}, \qquad (1)$$

où T est la *période* des oscillations égale à l'intervalle de temps minimal après lequel se répète un cycle complet des oscillations.

L'*amplitude totale* ou l'amplitude de crête à crête des oscillations périodiques est la valeur absolue de l'écart de la grandeur oscillante à partir d'une valeur extrême jusqu'à l'autre valeur extrême. Lorsque les valeurs extrêmes sont de signes contraires, l'amplitude de crête à crête est égale à la somme de leurs valeurs absolues (fig. 1).

Les oscillations périodiques de forme quelconque sont caractérisées par certaines valeurs moyennes des grandeurs oscillantes pendant une période.

La *valeur moyenne* d'une grandeur oscillante est la moyenne arithmétique de toutes les valeurs instantanées de cette grandeur pendant une période T (fig. 1).

La *valeur efficace* d'une grandeur oscillante est égale à la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des

valeurs instantanées de cette grandeur pendant une période T (fig. 1).

La *valeur équivalente* d'une grandeur oscillante est la valeur efficace de cette grandeur multipliée par $\sqrt{2}$.

Les oscillations périodiques des grandeurs vibratoires (déplacement, vitesse, accélération) qui varient dans le

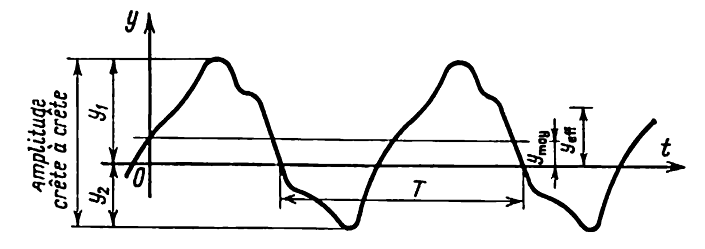


Fig. 1. Oscillations périodiques

temps suivant une loi sinusoïdale (ou cosinusoïdale) sont dites sinusoïdales ou *harmoniques* (fig. 2):

$$y = A \sin (\omega t + \psi), \qquad (2)$$

A étant *l'amplitude*, c'est-à-dire la valeur absolue maximale de la grandeur y; t le temps écoulé depuis l'origine des vi-

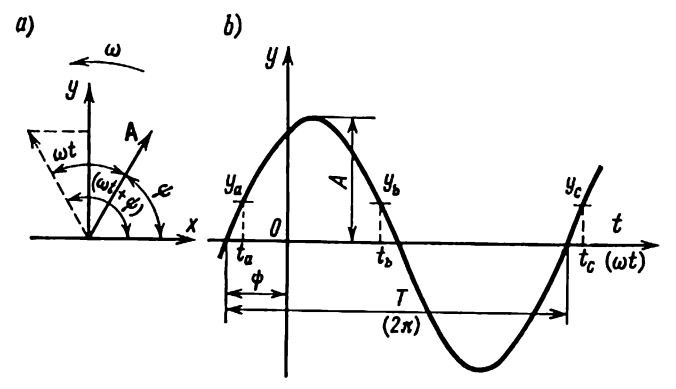


Fig. 2. Oscillations harmoniques

brations; $(\omega t + \psi)$ *l'angle de phase*; ψ l'angle de phase initial; ω la vitesse angulaire ou la *pulsation*.

En plus de la représentation graphique en coordonnées rectangulaires (fig. 2, *b*), les oscillations harmoniques peu-

vent être également figurées par un *vecteur conventionnel* [1]) dont la longueur, exprimée à une échelle déterminée est égale à l'amplitude des oscillations. Le vecteur tourne en sens inverse des aiguilles d'une montre, à la vitesse angulaire ω. On suppose, dans ces conditions, qu'à tout instant, la projection du vecteur sur l'axe *Oy* est égale en grandeur à la valeur instantanée de la grandeur oscillante et est dirigée dans le même sens que cette dernière (fig. 2, *a*).

Dans ce qui suit, nous écrirons en abrégé « vecteur de déplacement vibratoire », « vecteur d'accélération », etc.

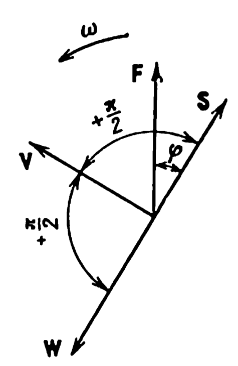


Fig. 3. Diagramme vectoriel de la force perturbatrice F, du déplacement vibratoire S, de la vitesse vibratoire V et de l'accélération vibratoire W

Pourtant on ne devra pas oublier qu'il s'agit dans ces cas d'un vecteur *tournant* dont la projection représente la valeur instantanée de la grandeur oscillante considérée.

L'emploi de diagrammes vectoriels permet de simplifier considérablement les calculs relatifs à l'alignement des machines à accoupler.

On appelle *phase* une caractéristique des oscillations harmoniques, à l'instant donné, qui est déterminée non seulement par la valeur instantanée de la grandeur oscillante mais aussi par le sens dans lequel varie cette valeur. C'est ainsi par exemple qu'à des instants de temps t_a, t_b et t_c (fig. 2, *b*) toutes les valeurs instantanées y_a, y_b et y_c sont égales en grandeur et de même signe mais seules les valeurs de y_a et y_c, qui diffèrent l'une de l'autre d'une période complète, varient dans le même sens.

En étudiant conjointement les oscillations synchrones de diverses grandeurs c'est-à-dire les oscillations harmoniques

[1]) Dans les diagrammes et dans le texte, les symboles littéraux des vecteurs sont en caractères gras.

à la même fréquence, on les représente sur un même diagramme vectoriel.

Une grandeur importante caractérisant le rapport entre diverses oscillations synchrones est le décalage dans le temps de leurs phases identiques qui est désigné en abrégé « *décalage de phase* » ou encore tout simplement « *déphasage* ».

Le déphasage est égal à la différence entre les angles de phases initiales et est déterminé sur un diagramme par l'angle que forment les vecteurs correspondants.

Le diagramme de la fig. 3 représente, à titre d'exemple, le vecteur d'une force perturbatrice **F** et les vecteurs de grandeurs vibratoires: du déplacement **S**, de la vitesse **V** et de l'accélération **W**, le déphasage entre ces vecteurs étant égal à $\frac{\pi}{2}$.

B. Opérations mathématiques les plus simples sur les oscillations harmoniques

L'addition (ou la soustraction) des oscillations synchrones de grandeurs de même nature agissant le long d'une même droite donne des oscillations harmoniques de même fréquence. Les oscillations résultantes sont représentées par un vecteur tournant à la même vitesse angulaire et égal à la somme géométrique des vecteurs représentant les oscillations à additionner. Un vecteur tournant peut être décomposé géométriquement en des vecteurs représentant les oscillations synchrones composantes.

Pour la réalisation des travaux ayant pour but la réduction des vibrations il est aussi important de déterminer les rapports qui existent entre les oscillations synchrones, par exemple entre la force perturbatrice et la vibration qu'elle provoque. Comme il a été indiqué plus haut, le vecteur **A** représentant les oscillations harmoniques est déterminé par son amplitude A et par son angle de phase initiale ψ. Un symbole unique, désigné par $\dot{A}$ ou $A \angle \underline{\psi}$, et incluant l'amplitude et l'angle est appelé *nombre complexe* qui correspond au vecteur **A**; A est appelé *module* et ψ *argument* du nombre complexe.

La multiplication d'un vecteur $\mathbf{A}_1$, dont le nombre complexe est $A_1 \angle \underline{\psi_1}$, par un nombre complexe $A_2 \angle \underline{\psi_2}$ donne un vecteur **C** dont le nombre complexe $C \angle \underline{\varphi}$ est égal à $A_1 A_2 \angle \underline{\psi_1 + \psi_2}$.

Pour diviser un vecteur $\mathbf{A}_1$ par un vecteur $\mathbf{A}_2$, il faut diviser le module A_1 par le module A_2 et retrancher l'argument ψ_2 de l'argument ψ_1.

En cas de superposition des oscillations harmoniques de fréquence différente, les vecteurs tournants *ne peuvent pas être employés*. Dans ce cas, les oscillations résultantes, qu'on appelle oscillations *polyharmoniques*, sont déterminées par l'*addition algébrique* des valeurs instantanées des oscillations à additionner.

Il est commode d'effectuer une telle addition graphiquement dans un système de coordonnées rectangulaires. La f équence et la forme des oscillations résultantes dépendent

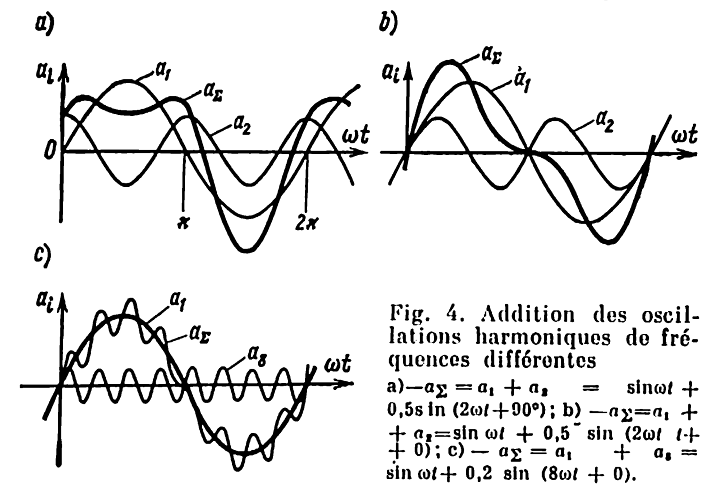


Fig. 4. Addition des oscillations harmoniques de fréquences différentes

a)—$a_\Sigma = a_1 + a_2 = \sin\omega t + 0{,}5\sin(2\omega t + 90°)$; b) —$a_\Sigma = a_1 + a_2 = \sin\omega t + 0{,}5 \sin(2\omega t + 0)$; c) — $a_\Sigma = a_1 + a_8 = \sin\omega t + 0{,}2 \sin(8\omega t + 0)$.

du nombre d'oscillations harmoniques additionnées ainsi que du rapport de leurs fréquences, amplitudes et phases initiales.

Si les fréquences des oscillations harmoniques superposées sont multiples de la fréquence la plus basse de ces oscillations, cette dernière s'appelle fréquence *fondamentale* ou premier harmonique ou encore harmonique de rang 1. Dans ce dernier cas, la fréquence des oscillations polyharmoniques résultantes est égale à la fréquence fondamentale.

La fig. 4 représente, à titre d'exemple, les courbes d'addition des harmoniques *1* et *2* et des harmoniques *1* et *8*.

Les oscillations périodiques complexes (non harmoniques) peuvent être décomposées en harmoniques c'est-à-dire repré-

sentées sous la forme d'une somme des composantes harmoniques. Une telle décomposition se fait à l'aide des appareils appelés *analyseurs*.

C. Etude des vibrations d'une machine

Les causes provoquant des vibrations excessives des machines électriques ont été examinées plus haut au § 44, et les normes à appliquer pour l'évaluation des vibrations sont citées dans l'annexe 12,D.

Avant de commencer les opérations en vue de réduire les vibrations, il faut en rechercher les causes, ce qui est souvent un problème délicat et exige dans certains cas de procéder à un examen détaillé non seulement de la machine donnée mais aussi des autres machines accouplées. Lors de cet examen, il est nécessaire de mesurer les déplacements vibratoires de tous les paliers du groupe et parfois aussi des autres organes, aux divers régimes de fonctionnement et à des vitesses de rotation différentes de l'arbre.

Il arrive très souvent que pour déterminer les causes de vibrations, on est amené à décomposer les oscillations mesurées en composantes harmoniques. En le faisant, il importe surtout de déterminer les oscillations à la fréquence fondamentale et à la double fréquence.

Si les données obtenues lors de l'examen témoignent des défectuosités mécaniques possibles de certains organes ou des défauts de nature électromagnétique, il est nécessaire, avant tout, d'effectuer des vérifications correspondantes de la machine.

Des vibrations anormales ayant pour cause un mauvais alignement des arbres, des défauts dans les paliers ou dans les ventilateurs, des courts-circuits entre spires dans le rotor, une double rigidité du rotor, des résonances de certains organes, etc. ne peuvent pas être supprimées par un équilibrage du rotor. C'est seulement dans les cas où l'examen de la machine a relevé un déséquilibre du rotor qu'on peut prendre la décision de procéder à son équilibrage.

D. Déséquilibre d'un rotor

On dit qu'un rotor considéré comme un corps absolument rigide est déséquilibré si son axe central principal d'inertie ne coïncide pas avec son axe de rotation. Suivant la répar-

tition des masses du rotor on distingue trois types de déséquilibre (GOST 19534-74):

1. Un **déséquilibre statique** qui a lieu lorsque l'axe principal d'inertie passe par le centre des masses *c* du rotor, tout en restant parallèle à l'axe de rotation *ox* (fig. 5, *a*).

Dans ce cas, toutes les forces d'inertie non équilibrées, ramenées au centre des masses d'un rotor tournant ne donnent que le vecteur résultant R_{st}, alors que le moment principal est égal à zéro. Un tel déséquilibre peut être détecté

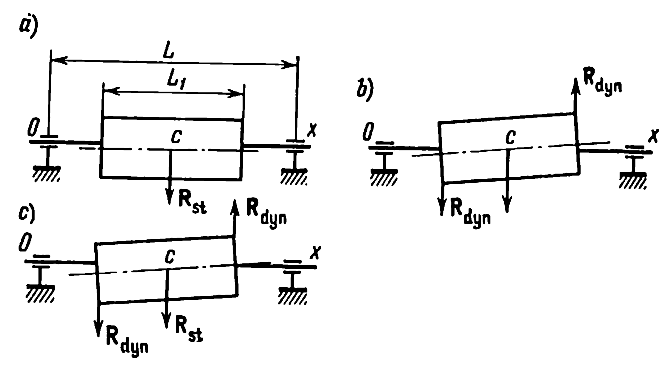


Fig. 5. Divers genres de déséquilibre d'un rotor rigide

sans faire tourner le rotor, par exemple sur des parallèles. Lors de la rotation d'un rotor symétrique, les paliers sont dans ce cas sollicités par deux forces perturbatrices de même valeur et dirigées dans le même sens.

2. Un **déséquilibre des moments** qui a lieu lorsque l'axe principal d'inertie coupe l'axe de rotation au centre des masses (fig. 5, *b*). Dans ce cas, toutes les forces d'inertie non équilibrées, ramenées au centre des masses d'un rotor tournant, ne donnent que le moment principal $R_{dyn} \times L_1$, alors que le vecteur résultant est nul. Un tel déséquilibre ne peut être mis en évidence que lors de la rotation du rotor, lorsqu'il se produit un moment perturbateur qui provoque des vibrations rotatives du rotor par rapport à un axe transversal passant par le centre des masses.

3. Un **déséquilibre dynamique** qui se caractérise par la présence à la fois d'un déséquilibre statique et d'un déséquilibre des moments du rotor (fig. 5, *c*). Dans le cas général, le vecteur résultant et le moment principal se trouvent dans des plans axiaux différents du rotor, et les forces per-

turbatrices qu'ils provoquent, peuvent s'appliquer aux paliers dans n'importe quel plan axial et se trouvent déphasées l'une par rapport à l'autre. L'axe du rotor et son axe central principal d'inertie se coupent en dehors du centre des masses ou se croisent.

On appelle *vecteur déséquilibre* un vecteur égal au produit de la masse non équilibrée par le rayon vecteur du centre de cette masse par rapport à l'axe du rotor, ce rayon vecteur étant désigné sous le nom d'*excentricité* de la masse.

Le sens du vecteur déséquilibre coïncide avec celui de l'excentricité.

Le *vecteur résultant* (D) *des déséquilibres d'un rotor* passe par le centre de ses masses, est égal à la somme de tous les vecteurs déséquilibres du rotor et tourne avec ce dernier.

Le déséquilibre statique d'un rotor est complètement déterminé: par le vecteur résultant (D) des déséquilibres, par l'excentricité (e_{st}) du centre de la masse du rotor ou par la valeur de cette dernière (e_{st}).

La grandeur (e_{st}) égale au rapport du module (D) du vecteur résultant des déséquilibres à la masse (M) du rotor est aussi appelée *déséquilibre spécifique* parce qu'elle détermine le déséquilibre par 1 kg de masse du rotor.

E. Oscillations libres et oscillations forcées d'un rotor

Considérons les oscillations dans le plan axial horizontal d'un rotor symétrique à supports déformables, par exemple du rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

Supposons pour simplifier le problème que:

1) le rotor est un *corps absolument rigide* (de masse M);

2) les paliers sont dénués de masse et possèdent les mêmes *coefficients* de rigidité k_p c'est-à-dire la force qu'il faut appliquer au palier pour le déplacer d'une unité de longueur; le rotor est accouplé aux paliers *par articulation*;

3) la résistance au mouvement vibratoire du rotor est concentrée aux paliers; la valeur de cette résistance, proportionnelle à la vitesse du mouvement vibratoire, est déterminée par le *coefficient d'amortissement c*.

Si l'un des enroulements inducteurs est mis en court-circuit et le rotor est parcouru par un courant, la force résultante d'attraction magnétique agissant entre le rotor et le stator sera dirigée dans le sens opposé au pôle défectueux. Dans ces conditions, le déplacement statique de l'axe

du rotor (et des paliers) a pour expression:

$$X_{st} = \frac{F}{2k_p}. \quad (3)$$

Si, le système étant dans cet état statique considéré, le courant d'excitation est coupé, le rotor commencera, ensemble avec les paliers, à se déplacer sous l'action des forces élastiques des paliers vers la position d'équilibre et, après avoir dépassé cette position, effectuera des oscillations libres (propres) rapidement amorties autour de cette position, tant que ne sera épuisée l'énergie reçue par le système rotor — paliers lors du fléchissement statique.

La fréquence des oscillations propres peut être déterminée dans ce cas à l'aide de la formule [12]:

$$f_{pr} = \frac{n_{pr}}{60} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_p}{M_p}} \quad \text{et} \quad n_{pr} \simeq 9{,}55\sqrt{\frac{k_p}{M_p}}, \quad (4)$$

où f_{pr} est la fréquence des oscillations propres en Hz; n_{pr} la fréquence des oscillations propres par minute; k_p le coefficient de rigidité du palier; M_p la masse du rotor ramenée à un seul palier en kg.

Lorsque le rotor est animé d'un mouvement de rotation uniforme et l'enroulement inducteur est parcouru par le courant d'excitation, la force F provoque, dans le plan axial quelconque, des oscillations forcées transversales du rotor (et des paliers) qui sont déterminées par la formule:

$$x = X_a \sin(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

où X_a est l'amplitude d'oscillation, c'est-à-dire la flèche dynamique maximale atteinte au cours des oscillations; ω la vitesse de rotation angulaire du rotor, en rd/s, égale à $n/9{,}55$, n étant la vitesse de rotation du rotor, en tr/mn.

Le rapport X_a/X_{st} appelé *coefficient dynamique* (β) et l'angle φ (le déphasage entre la force perturbatrice et le déplacement vibratoire) dépendent des paramètres du système et de la vitesse de rotation du rotor [12].

Sans nous étendre davantage sur ce genre d'oscillations forcées provoquées par une *force perturbatrice*, examinons maintenant les oscillations forcées d'un rotor en rotation dues à des masses placées sur le rotor.

Soit le même rotor parfaitement équilibré sur lequel on place, dans le plan de symétrie transversal, une masse m à la distance r de l'axe de rotation, par exemple une entre-

toise entre les pôles. Si le rotor tourne à la vitesse n, chacun des paliers subit, dans tout plan axial, l'action de la moitié de la force perturbatrice d'inertie non équilibrée dont l'amplitude a pour valeur:

$$F_a = mr\omega^2 \simeq 0{,}011mrn^2, \qquad (6)$$

F_a étant exprimée en N, m en kg, r en m.

Lorsque la vitesse de rotation varie, l'amplitude de la force dans ce dernier cas ne reste pas constante comme dans le cas précédent mais varie comme le carré de la vitesse de rotation. Une telle force est dite force *d'inertie*.

La résolution de l'équation du mouvement correspondante [12] donne les expressions suivantes respectivement pour la valeur instantanée et la valeur maximale (l'amplitude) du déplacement vibratoire:

$$x = X_a \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{et} \quad X_a = \beta_{\text{in}} e$$

ou pour l'amplitude crête à crête:

$$A = 2X_a = 2\beta_{\text{in}} e, \qquad (7)$$

où

$$\beta_{\text{in}} = \frac{\varepsilon^2}{\sqrt{(1-\varepsilon^2)^2 + (2D\varepsilon)^2}}; \quad \varepsilon = \frac{n}{n_{\text{pr}}}; \quad e = \frac{mr}{M} \qquad (8)$$

et D est un coefficient sans dimension dépendant des paramètres du système rotor — paliers.

Puisque le paramètre e donne la valeur du rayon de la masse m non équilibrée, ramenée à la masse totale M du rotor, c'est-à-dire la valeur de l'*excentricité du rotor*, la signification physique du coefficient β_{in} est la suivante: il montre de combien de fois l'amplitude des oscillations du palier est plus grande en cas d'une perturbation d'inertie d'un système réel qu'en l'absence de forces élastiques et de frottement dans le palier.

La fig. 6 montre les courbes de variation du coefficient β_{in} et de l'angle φ en fonction de n/n_{pr}.

Il résulte de l'expression (8) ainsi que des courbes de la fig. 6 que pour $n/n_{\text{pr}} \ll 1$, le coefficient $\beta_{\text{in}} \simeq 0$, pour $n/n_{\text{pr}} \gg 1$, on a $\beta_{\text{in}} \simeq 1$ et pour $n/n_{\text{pr}} \simeq 1$ le coefficient β_{in} atteint sa valeur maximale.

Si l'on place sur le rotor deux masses symétriques, chacune de valeur m, on aura:

$$e_{\text{sym}} = \frac{2mr}{M} \quad \text{et} \quad A_{\text{sym}} = 2\beta_{\text{in}} e_{\text{sym}} = \frac{4mr}{M}\beta_{\text{in}}. \qquad (9)$$

Installons sur un rotor parfaitement équilibré deux masses m symétriques gauches, en plaçant chacune d'elles à la distance r de l'axe de rotation. Lors de la rotation du rotor, les paliers sont soumis, dans tout plan axial, à l'action d'un moment perturbateur dont la fréquence est celle de la rotation ; ce moment provoque dans le plan considéré des oscillations rotatives du rotor et des paliers par rapport à l'axe de symétrie transversal perpendiculaire au plan des oscillations et passant par le centre des masses du rotor.

En cas de telles oscillations, le rôle de masse est joué par le moment d'inertie du rotor par rapport à l'axe transversal de symétrie alors que les couples résistants qui s'opposent au mouvement sont développés par les forces élastiques et les forces de frottement dans les paliers.

La fréquence des oscillations rotatives libres d'un rotor symétrique tournant dans des supports déformables est donnée par la formule :

$$n_{\text{pr. rot}} = n_{\text{pr}} \frac{L}{2\rho}, \qquad (10)$$

où n_{pr} est la fréquence des oscillations libres de translation du même rotor par minute ; L la distance entre les axes transversaux des supports (voir fig. 5) ; ρ le rayon de giration du rotor par rapport à l'axe transversal passant par le centre des masses du rotor.

L'amplitude crête à crête des oscillations rotatives des paliers provoquées par des masses symétriques gauches placées sur le rotor a pour expression :

$$A_{\text{rot}} = A_{\text{sym}}\theta, \qquad (11)$$

où A_{sym} est l'amplitude crête à crête des oscillations transversales des paliers pour les mêmes masses symétriques ; θ un coefficient sans dimension dépendant des paramètres intervenant dans l'expression de β_{in} (voir 8), de L_1/L et de $2\rho/L$ (voir fig. 5).

Le placement sur le rotor d'une masse m unilatérale est équivalent au placement dans le même plan axial d'une paire de masses symétriques et d'une paire de masses symétriques gauches, dont chacune a une valeur de $m/2$.

Dans le cas où les oscillations provoquées par ces paires de masses (c'est-à-dire par une masse unilatérale) s'ajoutent algébriquement, l'amplitude crête à crête des oscillations de l'un des paliers atteint sa valeur maximale ayant pour expression :

$$A_{\text{unilat.}} = A_{\text{sym}} + A_{\text{rot}} = \frac{2mr}{M} \beta_{\text{in}} (1 + \theta). \qquad (12)$$

F. Vitesses critiques de rotation du rotor dans le système rotor—paliers

L'examen des expressions (7 et 8) et de la fig. 6 montre que les oscillations des paliers augmentent fortement lorsque

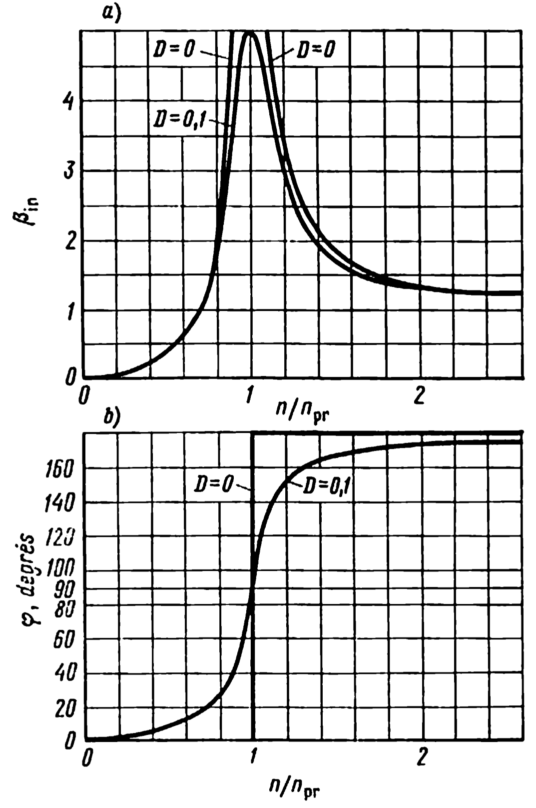


Fig. 6. Oscillations d'un palier sous l'effet d'une perturbation d'inertie:

a) variation de $\beta_{in} = \frac{x_a}{e}$ en fonction de n/n_{pr}; b) variation du déphasage φ de la force perturbatrice et du déplacement vibratoire en fonction de n/n_{pr}

la fréquence de la force perturbatrice coïncide avec la fréquence des oscillations libres permanentes du système. Un tel phénomène est connu sous le nom de *résonance*. Dans le

système rotor — paliers, la fréquence de la force perturbatrice dépend de la fréquence de rotation du rotor. C'est pourquoi, ce système vient en résonance lorsque la fréquence de rotation du rotor n [osc/mn] coïncide avec la fréquence des oscillations libres de translation ou de rotation $n_{pr.\,sym.}$ ou $n_{pr.rot}$ [osc/mn] du rotor dans le plan axial considéré.

C'est ainsi que le rotor tournant dans des supports souples possède deux vitesses critiques de rotation et deux formes

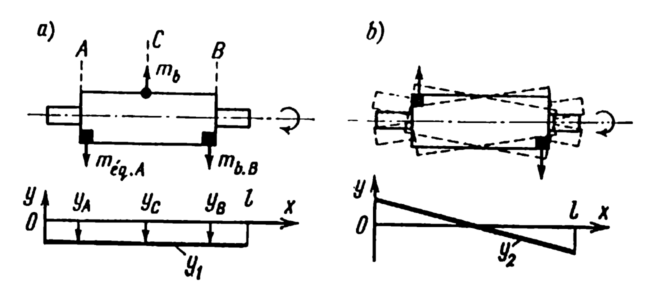


Fig. 7. Première (*a*) et deuxième (*b*) formes des oscillations propres d'un rotor rigide à supports élastiques

des oscillations libres (fig. 7) que nous appellerons abréviativement « rigides ».

La première vitesse critique rigide de rotation [voir (4)] a pour expression

$$n_I = 9{,}55 \sqrt{\frac{k_p}{M_p}}\,,\ \text{tr/mn}. \tag{13}$$

La deuxième vitesse critique rigide s'exprime par [voir (10)]:

$$n_{II} = n_I \frac{L}{2\rho}\,,\ \text{tr/mn}. \tag{14}$$

Pour les machines de construction courante on a $\frac{L}{2\rho} \simeq$ $\simeq 1{,}8$ à $2{,}8$.

Les rotors absolument rigides n'existent pas. En outre, dans les rotors réels, la masse et la rigidité sont réparties le long de toute la ligne d'arbres. Il en résulte que le système rotor — paliers possède non deux mais plusieurs vitesses critiques correspondant à des fréquences des oscillations libres de flexion du rotor.

Pour un arbre de section constante, tournant dans des paliers absolument rigides, les valeurs de ces vitesses criti-

ques sont données par la formule :

$$n_k = 9{,}55\left(\frac{k\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{\mu}}, \tag{15}$$

où EJ est la rigidité en flexion de l'arbre; μ la masse de l'arbre par unité de longueur; $k = 1, 2, 3, \ldots$

Les vitesses critiques d'un tel arbre sont liées entre elles par les rapports suivants :

$$n_1 : n_2 : n_3 \ldots = 1 : 2^2 : 3^2 \ldots \tag{16}$$

A chaque vitesse critique de rotation correspond sa forme de flexion qui est une sinusoïde aplatie $y_k = \sin k\,\frac{\pi}{l}\,x$.

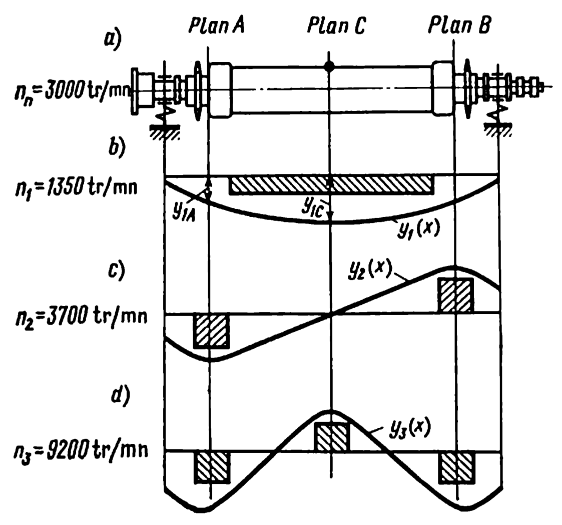


Fig. 8. Trois premières formes propres de la flexion du rotor d'un turbo-alternateur de 150 MW à supports élastiques

Le nombre d'alternances d'une telle sinusoïde, contenues dans la longueur de l'arbre, est égal au numéro d'ordre de la vitesse critique.

Dans les rotors réels, les rigidités et les masses sont réparties inégalement le long de l'axe et leurs supports ne sont pas absolument rigides, de sorte que la forme de la flèche des rotors réels diffère de celle d'une sinusoïde. La fig. 8 montre trois premières formes de la flexion (y_1, y_2, y_3) du rotor d'un turbo-alternateur de 150 MW de puissance

en cas de son installation dans une centrale électrique. Sur la même figure sont données les valeurs des vitesses critiques (n_1, n_2, n_3). Dans ce cas, les rapports (16) ne sont plus vérifiés.

Suivant le rapport entre la vitesse nominale de travail et la vitesse critique de rotation, les rotors de machines électriques se rangent en deux classes : les rotors rigides et les rotors souples. Il n'y a pas de frontière nette entre ces deux classes mais **on convient de ranger un rotor dans la classe de rotors rigides si $n_n < 0{,}7_{n_1}$ et dans la classe de rotors souples dans le cas contraire.**

Pour des vitesses de rotation du rotor, sensiblement inférieures à ses vitesses critiques de flexion c'est-à-dire lorsque le rotor peut être considéré comme rigide, la flèche élastique de l'arbre est négligeable par rapport à celle de ses supports. Dans ce dernier cas, les oscillations du rotor s'effectuent de telle manière qu'en présence du seul déséquilibre statique, l'axe du rotor vibre dans l'espace tout en restant parallèle à lui-même alors qu'en présence de déséquilibre dynamique l'axe du rotor subit des oscillations rotatives autour du centre de gravité (fig. 7).

A des vitesses de rotation de l'arbre, voisines des valeurs critiques, c'est-à-dire lorsque le rotor est considéré comme étant souple, les flèches de l'arbre sont de l'ordre de grandeur des vibrations des supports et même nettement supérieures à celles-ci.

Lorsqu'un arbre présente des déséquilibres de plusieurs genres, sa ligne de flexion élastique est une courbe gauche dont la forme varie avec la vitesse de rotation.

G. Problème d'équilibrage

La rotation d'un arbre mal équilibré fait naître des forces centrifuges qui exercent des pressions variables sur ses supports. La rigidité des supports des machines réelles n'étant pas infinie, ces pressions provoquent des vibrations.

L'opération d'équilibrage a pour but de déterminer une telle répartition des masses d'équilibrage sur le rotor pour laquelle les vibrations des supports ne dépassent pas les normes admises dans tout l'intervalle de vitesses de rotation du rotor (de zéro jusqu'à la vitesse de régime).

Lorsque les oscillations d'un rotor tournant ont atteint leur régime établi, l'équation des travaux produits dans le

plan axial du rotor peut s'écrire sous la forme:

$$\Sigma my = R_{I}y_{I} + R_{II}y_{II}, \tag{17}$$

où Σmy est la somme des travaux effectués par tous les balourds du rotor et par toutes les masses de compensation placées sur le rotor, qui sont *considérées comme des vecteurs* orientés dans le sens des forces centrifuges qu'ils provoquent; y_{I} et y_{II} sont les flèches des supports; R_{I} et R_{II} les réactions des supports.

La réaction des supports d'un arbre tournant sera inexistante ($R_{I} = R_{II} = 0$) ou, autrement dit, l'arbre sera parfaitement équilibré, si la somme des travaux effectués par les balourds et les masses de compensation sur les flèches dans les plans de leur emplacement est égale à zéro:

$$\sum my = 0. \tag{18}$$

Cette dernière égalité exprime la condition d'équilibre d'un arbre. Dans le cas de rotors rigides, l'équilibrage réalisé pour une vitesse de rotation se conserve également pour d'autres vitesses parce que les rapports entre les flèches du rotor dans divers plans et, par conséquent l'égalité (18), restent valables.

Il n'en est pas de même pour un rotor souple. Supposons qu'un tel rotor présente au milieu un balourd de masse m. Equilibrons ce rotor à une basse vitesse de rotation lorsqu'il se comporte en rotor rigide (par exemple sur une équilibreuse). Les masses d'équilibrage placées dans les plans en bout A et B (fig. 7, a) doivent satisfaire à l'égalité (18):

$$m_{b}y_{C} + m_{éq.\,A}y_{A} + m_{éq.\,B}y_{B} = 0.$$

Puisque $y_{A} = y_{B} = y_{C}$, on a $m_{éq,\,A,\,B} = -m_{b}/2$.

Si, maintenant, la vitesse de rotation du rotor est élevée jusqu'à la première vitesse critique (non sur l'équilibreuse mais dans ses propres paliers), la ligne de flexion élastique de l'arbre aura une forme pareille à celle indiquée par la fig. 8, b; puisque, dans ces conditions, $y_{1C} \neq y_{1A} = y_{1B}$, les masses d'équilibrage auront pour valeur; $m_{éq} = -\frac{m_{b}}{2} \cdot \frac{y_{1C}}{y_{1A,\,1B}}$, c'est-à-dire seront plus grandes qu'auparavant ($y_{1C} > y_{1A}$). Si l'on conserve les masses d'équilibrage

obtenues à une basse vitesse, le rotor sera de nouveau déséquilibré à une vitesse plus élevée.

A la deuxième vitesse critique on a : $y_{2C} = 0$ et l'égalité (18) se trouve vérifiée sans emploi de masses d'équilibrage.

Si l'on fait tourner le rotor à la troisième vitesse critique (fig. 8, *d*), il faudra, pour assurer son équilibrage, placer dans les plans en bout des masses de compensation inférieures à m_b et disposées du même côté par rapport à l'axe de rotation. On peut s'en assurer facilement à l'aide de l'égalité (18) et de la fig. 8, *d*.

L'exemple que nous venons de considérer montre qu'en plaçant les masses de compensation dans deux plans, on ne peut équilibrer un rotor souple que pour une *seule vitesse de rotation*. A d'autres vitesses de rotation, il pourra se trouver de nouveau mal équilibré. C'est là que réside la principale difficulté que présente l'équilibrage des rotors souples.

II. Types d'équilibrage. Equilibrage statique

On distingue trois types d'équilibrage : équilibrage statique, équilibrage des moments et équilibrage dynamique. L'équilibrage statique est effectué sans faire tourner le rotor ; il ne permet de réduire que la composante statique du déséquilibre.

Lorsque le rotor présente un déséquilibre de deux genres, l'équilibrage statique ne fait que faciliter la réalisation de l'équilibrage dynamique qui doit le suivre obligatoirement. L'équilibrage dynamique se fait sur un rotor tournant et permet de réduire le déséquilibre de toute nature.

L'équilibrage statique se fait au moyen de prismes d'acier parallèles (qu'on appelle tout court *parallèles*) dont les surfaces trempées doivent être rectifiées avec le plus grand soin (qualité non inférieure à ∇ 5).

Leur installation sur des supports spéciaux doit pratiquement exclure toute flèche des parallèles chargées ; l'écart que leurs plans de travail peuvent présenter par rapport au plan horizontal ne doit pas être supérieur à 0,1 mm par 1 m de longueur.

La largeur b d'une parallèle est déterminée par l'inégalité

$$b \geqslant \frac{M}{d}, \tag{19}$$

où M est la masse du rotor par une parallèle, en kg; d le diamètre du tourillon du rotor, en mm.

Le rotor placé par ses tourillons sur les parallèles est mis hors d'équilibre et abandonné à lui-même (fig. 9). Après avoir effectué quelques oscillations, le rotor s'immobilise, son « *endroit léger* » étant orienté vers le haut. Cet endroit est noté (le point a) sur la verticale passant par l'axe du rotor.

Après cela, on choisit une masse de compensation d'une valeur telle que son placement à l'endroit « léger » permette d'obtenir un état indifférent du rotor, quelle que soit sa position sur les parallèles. Un simple calcul permet d'accélérer cette opération d'équilibrage statique. A cet effet, on note sur le rotor (voir fig. 9) deux positions: 1) le point a

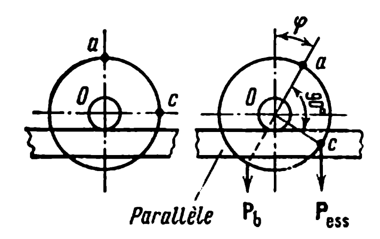


Fig. 9. Equilibrage statique:
P_b : poids de la masse non équilibrée;
P_{ess} : poids de la masse de compensation de l'essai

après que le rotor sans masse de compensation a pris de lui-même une position fixe; 2) l'angle φ après l'arrêt du rotor avec une masse de compensation de l'essai fixée au point C sous un angle de 90° par rapport au rayon oa. Puisque $m_b =$ $= m_{néc}$, la valeur de la masse de compensation qui doit être placée au point a (endroit « léger ») est donnée par la formule:

$$m_{néc} = \frac{m_{ess}}{\operatorname{tg} \varphi}, \tag{20}$$

où $m_{néc}$ est la masse d'équilibrage nécessaire, en kg; m_{ess} la masse de compensation de l'essai, en kg.

Si les surfaces de travail des parallèles sont de haute qualité et leur positionnement est effectué avec beaucoup de soin, l'équilibrage statique permet de réduire le déséquilibre résiduel spécifique (l'excentricité résiduelle) jusqu'à une valeur de l'ordre de 5 à 10 microns (voir relation 8).

I. Généralités sur les appareils de mesure des vibrations utilisés pour l'équilibrage dynamique

Pour pouvoir procéder à l'équilibrage dynamique il faut disposer des appareils permettant d'évaluer objectivement les paramètres de vibration des paliers.

Comme il a été montré plus haut, chaque grandeur vibratoire est un vecteur et la mesure de la valeur quantitative de ce vecteur ne suffit donc pas à elle seule pour qu'on puisse juger des variations des paramètres de la vibration au cours de l'équilibrage. Toutes les méthodes d'équilibrage efficace supposent l'emploi d'appareils permettant de mesurer les paramètres de la vibration en tant que grandeurs

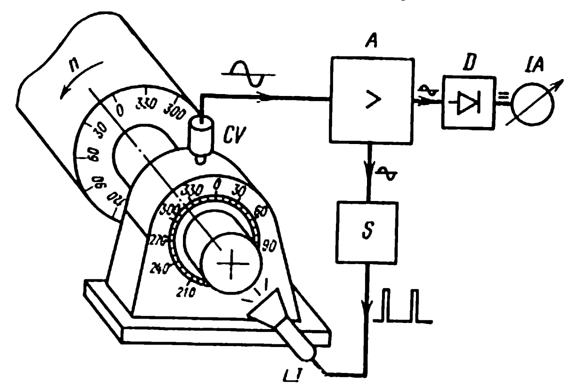


Fig. 10. Schéma synoptique d'un appareil d'équilibrage pour la mesure d'un paramètre de vibration

vectorielles, c'est-à-dire de mesurer aussi bien l'amplitude que la phase de ces grandeurs. Par phase on entend le déphasage que la grandeur vibratoire à mesurer présente par rapport à un processus de référence qui se déroule en synchronisme avec la rotation du rotor à équilibrer.

Les plus employés sont des appareils électroniques à capteurs de vibrations du type sismique et à phasemètres fonctionnant selon le principe de l'effet stroboscopique. La fig. 10 représente le schéma fonctionnel d'un tel appareil lors de la mesure du paramètre de vibration.

Le corps du capteur de vibrations *CV* est appuyé sur le palier de la machine soit à la main, par l'intermédiaire d'une sonde, soit par fixation, et oscille ensemble avec le palier.

L'équipage mobile suspendu à l'intérieur du capteur à l'aide de ressorts est conçu et réalisé de manière que dans la gamme de fréquences des oscillations à mesurer il reste pratiquement immobile (suspension type sismique).

Le déplacement relatif du corps et de la masse sismique du capteur est converti en un signal électrique qui est appliqué à l'entrée de l'amplificateur *A*. Le signal amplifié est redressé par le détecteur *D* et est injecté dans l'indicateur à aiguille *IA* qui mesure l'amplitude crête à crête du paramètre de vibration.

En même temps, un signal prélevé à l'amplificateur alimente un bloc stroboscopique qui produit des impulsions de tension servant à commander les éclats d'une lampe sans inertie *LI*. Si la face en bout du rotor à équilibrer porte un trait de repère, celui-ci semble être immobile en cas d'éclairage stroboscopique. La position angulaire de ce trait de repère est déterminée par la phase de la tension produite par le capteur de vibrations ou, ce qui revient au même, par la phase du paramètre de vibration qu'on mesure. Si l'on place près du bout de rotor un cadran circulaire fixe, l'angle indiqué par le trait de repère est considéré comme angle de phase initiale du paramètre de vibration mesuré. La phase du paramètre de vibration subissant une variation, le trait de repère se déplace, depuis sa position initiale, d'un angle correspondant au déphasage du paramètre de vibration.

Des installations plus complexes comportent, en plus des organes indiqués plus haut, des filtres pour l'analyse harmonique de la courbe représentative du paramètre de vibration, des fréquencemètres ou des tachymètres pour le contrôle de la vitesse de rotation et d'autres dispositifs permettant d'obtenir une importante information complémentaire, en cas des équilibrages complexes et des études des vibrations. Pourtant, l'emploi d'un appareil ne comportant qu'un mesureur d'amplitude crête à crête du paramètre de vibration et qu'un phasemètre est une condition nécessaire et en même temps suffisante pour pouvoir équilibrer les rotors de nombreuses machines électriques.

J. Méthodes d'équilibrage dynamique

Pour réaliser l'équilibrage dynamique d'un rotor dans ses paliers il faut disposer non seulement de l'appareillage nécessaire mais aussi recourir à des méthodes convenables.

On ne doit pas commencer l'équilibrage d'une machine sans avoir d'avance une idée précise de la séquence des opérations à exécuter ou en espérant déterminer à tâtons, par reports successifs, l'emplacement de la masse de compensation.

Actuellement, il existe plusieurs méthodes différentes de l'équilibrage dans lesquelles le vecteur de la masse de compensation nécessaire est déterminé par calcul sur la base des variations du paramètre de vibration provoquées par le placement des masses de compensation d'essai sur le rotor. Chacune de ces méthodes permet de réaliser un équilibrage voulu du rotor de la machine, mais il existe entre ces méthodes des différences substantielles concernant tant l'ordre des opérations à exécuter lors de l'équilibrage que le volume des calculs à effectuer.

Les méthodes utilisées pour l'équilibrage dynamique sont basées sur la supposition que lorsque la vitesse de rotation du rotor est maintenue constante, les amplitudes crête à crête de la composante harmonique fondamentale du déplacement vibratoire des paliers sont proportionnelles, dans chaque étape d'équilibrage, c'est-à-dire d'une mise en marche à l'autre, aux forces perturbatrices qui les engendrent, et le déphasage entre la force perturbatrice et le déplacement vibratoire ne varie pas.

Avant de commencer l'équilibrage proprement dit, il convient d'exécuter les opérations préparatoires suivantes: effectuer le traçage des plans de correction dans le sens de rotation avec des intervalles non supérieurs à 30°; les repères zéro doivent se trouver des deux côtés dans le même plan radial. Marquer à la peinture, dans le même plan, le repère de rayon initial sur le bout du rotor commode à observer. Placer près de ce bout du rotor un limbe pour la lecture de l'angle de phase sur le stroboscope (fig. 10); le traçage angulaire du limbe doit être fait dans le sens opposé à la rotation du rotor avec un intervalle non supérieur à 10°. Le repère zéro du limbe doit se disposer verticalement en haut.

Les appareils utilisés pour l'équilibrage sont à préparer au travail comme il est prescrit dans leurs notices d'emploi.

1. Equilibrage dans un seul plan de correction. Nous commencerons l'étude des méthodes employées pour l'équilibrage des rotors dans leurs propres paliers par l'examen de l'équilibrage d'un disque de faible épaisseur monté sur

un arbre rigide (fig. 11, *a*) et présentant seulement un déséquilibre statique et un seul plan de correction. Lorsque les supports de l'arbre sont disposés symétriquement, le balourd $\mathbf{m}_b$ provoque, lors de la première mise en route, des déplacements vibratoires $\mathbf{A}_1$, égaux et de même sens, des supports qui sont liés à la masse $\mathbf{m}_b$ par la relation :

$$\mathbf{A}_1 = \dot{k}\mathbf{m}_b, \tag{21}$$

où $\dot{k} = k \angle \alpha$ est un nombre complexe appelé *sensibilité du support à la masse d'équilibrage* en déplacement vibratoire (voir section B du présent annexe).

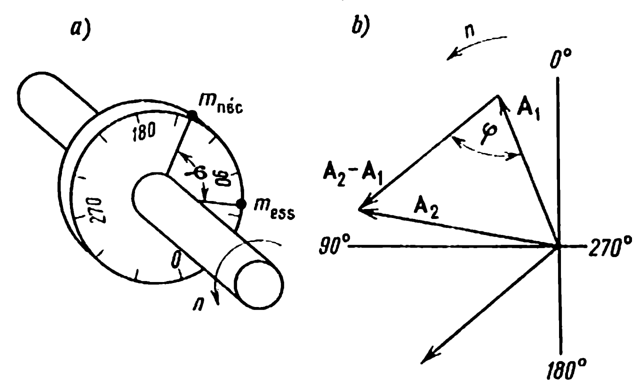


Fig. 11. Diagramme vectoriel lors de l'équilibrage d'un disque de faible épaisseur

Posons sur le rotor une masse d'équilibrage de l'essai $\mathbf{m}_{ess}$ et effectuons sa deuxième mise en marche : le déplacement vibratoire aura pour expression :

$$\mathbf{A}_2 = \dot{k}(\mathbf{m}_b + \mathbf{m}_{ess}).$$

De ces équations, nous trouvons :

$$\mathbf{m}_b = \mathbf{m}_{ess}\frac{\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}. \tag{22}$$

La masse d'équilibrage nécessaire est : $\mathbf{m}_{néc} = -\mathbf{m}_b$;

$$\mathbf{m}_{néc} = \mathbf{m}_{ess}\frac{-\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}. \tag{22a}$$

Il est commode de calculer la valeur de $\mathbf{m}_{néc}$ donnée par la formule (22), en commençant par une construction

graphique et en passant ensuite au calcul. Construisons dans le diagramme vectoriel (fig. 11, *b*), à la même échelle, les vecteurs $\mathbf{A}_1$ et $\mathbf{A}_2$; le vecteur tracé de l'extrémité de $\mathbf{A}_1$ vers $\mathbf{A}_2$ est égal à la différence de ces vecteurs ($\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$); sa grandeur et son sens sont déterminés par le diagramme vectoriel. Puis, on termine analytiquement le calcul de $\mathbf{m}_{\text{néc}}$.

L'examen du diagramme de la fig. 11, *b* montre que si le vecteur $\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$ de la variation de déplacement vibratoire due à la masse d'équilibrage de l'essai se trouve égal en grandeur, mais de signe contraire, au vecteur du déplacement vibratoire initial $\mathbf{A}_1$, le rotor sera équilibré parce que $\mathbf{A}_2$ sera nulle. A cet effet, il est nécessaire de modifier le vecteur de la masse d'équilibrage de l'essai par rapport aux modules des vecteurs $\mathbf{A}_1$ et ($\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$) et de le faire tourner d'un angle φ que font les vecteurs $-\mathbf{A}_1$ et ($\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1$). C'est justement cette opération qui est effectuée lors du calcul en multipliant le vecteur $\mathbf{m}_{\text{ess}}$ par le nombre complexe $\dfrac{-\mathbf{A}_1}{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}$.

En résolvant les équations (21) et (22a) par rapport à $\dot{k}$, nous obtenons:

$$\dot{k} = \frac{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}{\mathbf{m}_{\text{ess}}} \ \frac{\mu}{\text{kg}} \,\underline{|\ \text{degré}}, \tag{23}$$

ce qui signifie que le *nombre complexe exprimant la sensibilité du support à la masse d'équilibrage d'après le déplacement vibratoire est égal au rapport du vecteur de la variation du déplacement vibratoire au vecteur de la masse d'équilibrage qui a provoqué cette variation.*

Pour un rotor de type donné et des appareils utilisés pour les mesures, la sensibilité est déterminée d'après les résultats de l'équilibrage après quoi l'équilibrage des rotors de même type peut être effectué en utilisant la valeur connue de $\dot{k}$.

Représentons la formule (22a) sous une forme légèrement modifiée:

$$\mathbf{m}_{\text{néc}} = \frac{-\mathbf{A}_1}{\dfrac{\mathbf{A}_2 - \mathbf{A}_1}{\mathbf{m}_{\text{ess}}}} = \frac{-\mathbf{A}_1}{\dot{k}}. \tag{24}$$

La formule (24) est commode pour le calcul de la masse d'équilibrage nécessaire lorsqu'on connaît la sensibilité d'équilibrage, par exemple pour un nouvel équilibrage de la même machine ou d'une machine de même type.

Exemple numérique. A la première mise en marche, le déplacement vibratoire de chacun des paliers est égal à $A_1 = 60 \angle 20$. Lors de la mise en marche avec une masse d'équilibrage de l'essai $m_{ess} = 1,2 \angle 70$, les déplacements vibratoires des paliers sont égaux à $A_2 = 75 \angle 80$. Construisons sur le diagramme (fig. 11, *b*) les vecteurs A_1 et A_2 et trouvons $(A_2 - A_1) = 69 \angle 130$.

La masse d'équilibrage nécessaire a pour valeur:

$$m_{néc} = m_{ess}\frac{-A_1}{A_2 - A_1} = 1,2 \underline{|70} \cdot \frac{60 \underline{|20+180}}{69 \underline{|130}} =$$

$$= 1,2 \underline{|70} \cdot 0,87 \underline{|70} = 1,04 \underline{|140}.$$

La masse d'équilibrage nécessaire est inférieure à la masse de l'essai parce que l'accroissement du déplacement vibratoire ΔA_1 est plus grand que le déplacement vibratoire initial A_1; en outre, son vecteur est tourné, par rapport à celui de la masse d'essai, d'un angle $\varphi = +70°$ (c'est-à-dire dans le sens de rotation du rotor). L'angle φ correspond à une rotation du vecteur ΔA_1 pour laquelle ce dernier se trouve en opposition avec le vecteur A_1 (voir fig. 11).

Déterminons la sensibilité d'équilibrage:

$$\dot{k} = \frac{A_2 - A_1}{m_{ess}} = \frac{69 \underline{|130}}{1,2 \underline{|70}} = 57 \underline{|60}.$$

2. Equilibrage d'un rotor rigide symétrique dans deux plans de correction. Dans la plupart des cas, les machines électriques sont réalisées à rotors symétriques si bien que la méthode la plus efficace consiste à compenser séparément la composante statique et la composante des moments du déséquilibre dynamique d'un rotor. Cette méthode constitue un cas particulier de la méthode générale d'équilibrage des arbres souples d'après la forme des oscillations libres.

Etant bien suggestive et n'exigeant que des calculs simples, elle permet pourtant de réaliser l'équilibrage d'un rotor au moyen d'un petit nombre de mises en marche. En effectuant l'équilibrage d'un rotor symétrique à deux supports d'après la méthode de la réduction séparée des composantes de déséquilibre, on fait intervenir dans les calculs non les déplacements vibratoires mesurés des supports, mais leurs composantes dues au déséquilibre statique et à celui

des moments. On peut facilement montrer [12] que ces composantes sont égales respectivement à la demi-somme vectorielle et à la demi-différence vectorielle des déplacements vibratoires des supports:

$$\left.\begin{aligned} A' &= \frac{A_I + A_{II}}{2}; \\ A'' &= \frac{A_I - A_{II}}{2}, \end{aligned}\right\} \qquad (25)$$

où A_I et A_{II} sont les vecteurs des déplacements vibratoires des supports I et II; A' est la composante du déplacement vibratoire du support due au déséquilibre statique (composante symétrique); A'' la composante du déplacement vibratoire du support due au déséquilibre des moments (composante symétrique gauche).

La nécessité de représenter les déplacements vibratoires des supports par leurs composantes symétriques et symétriques gauches tient à ce que, dans le cas des rotors symétriques, ces composantes possèdent une importante propriété d'être *indépendantes l'une de l'autre*: la variation de la composante statique du déséquilibre ne fait varier que la composante symétrique A' du déplacement vibratoire alors que la composante symétrique gauche A'' reste inchangée et inversement.

C'est sur cette propriété de non-interdépendance qu'est fondée la méthode de l'équilibrage séparé:

1. Les déplacements vibratoires des supports sont décomposés en composante symétrique et en composante symétrique gauche.

2. La composante statique et la composante des moments sont compensées séparément: la première d'après les composantes symétriques et la deuxième d'après les composantes symétriques gauches des déplacements vibratoires des supports.

Les masses d'équilibrage sont à calculer au moyen des mêmes formules (22a) et (24), mais en y substituant aux déplacements vibratoires des supports leurs composantes correspondantes:

a) lors de la réduction de la composante due au déséquilibre statique: m_{ess} est le vecteur de la masse d'équilibrage de l'essai faisant partie du système statique,

$$A_1 = \frac{A_{1I} + A_{1II}}{2}; \quad A_2 = \frac{A_{2I} + A_{2II}}{2},$$

$\dot{k}'$ étant la sensibilité d'équilibrage à la composante due au déséquilibre statique (sensibilité à la statique);

b) lors de la compensation de la composante due au déséquilibre des moments: m_{ess} est le vecteur de la masse d'équilibrage de l'essai faisant partie du système de moments;

$$A_1 = \frac{A_{1I} - A_{1II}}{2}; \quad A_2 = \frac{A_{2I} - A_{2II}}{2},$$

où A_{1I} est le vecteur du déplacement vibratoire du support du côté I lors de la première mise en marche; A_{1II} le même vecteur que A_{1I} mais du côté II; A_{2I} le vecteur du déplacement vibratoire du support du côté I lors de la mise en marche avec la masse de l'essai; A_{2II} le même vecteur que A_{2I} mais du côté II; $\dot{k}''$ la sensibilité d'équilibrage à la composante due au déséquilibre des moments (sensibilité au couple).

En posant sur le rotor les systèmes de masses de l'essai et de masses d'équilibrage définitif, on doit veiller à ce que les masses faisant partie du système soient rigoureusement identiques et que leurs angles d'installation soient les mêmes ou différents de 180° l'un de l'autre. Dans le cas contraire, la compensation de l'une des composantes de déséquilibre pourra compromettre celle de l'autre.

Si les masses faisant partie du système sont fixées dans les plans de correction sur des diamètres différents, leurs valeurs doivent être inversement proportionnelles à ces diamètres.

Pour les calculs au moyen des formules (22a) et (24), on peut utiliser les déplacements vibratoires tant horizontaux que verticaux, mieux vaut prendre ceux qui sont plus grands.

Exemple numérique. Equilibrons dynamiquement une machine synchrone (puissance $P = 800$ kW, vitesse $n = 1\,500$ tr/mn).

Les mesures effectuées lors de la première mise en marche (n° 1) de la machine ont montré que tous les déplacements vibratoires des supports sont augmentés (voir tableau 1) mais que les déplacements horizontaux sont plus grands que ceux dans le plan vertical; effectuerons donc l'équilibrage d'après les déplacements horizontaux.

Construisons dans le diagramme de la fig. 12 les vecteurs $A_{1I} = 100\,\underline{/350}$ et $A_{1II} = 120\,\underline{/50}$.

Trouvons la demi-somme $A'_1 = 96 \angle 22$ et la demi-différence $A''_1 = 56 \angle 280$ de ces vecteurs. Puisque $A'_1 > A''_1$, commençons l'équilibrage par compenser la composante due au déséquilibre statique.

Fixons des masses identiques dans les plans de correction, en les plaçant sous le même angle. Les valeurs de ces masses et des angles peuvent être déterminées de façon approchée en suivant les recommandations données dans la section *L* de

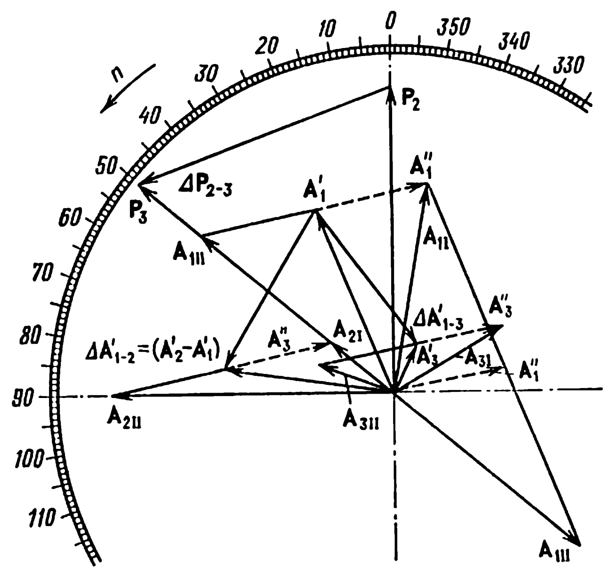


Fig. 12. Diagramme vectoriel lors de l'équilibrage d'après les composantes symétriques des déplacements vibratoires

la présente annexe. Si les renseignements nécessaires au choix de m_{ess} ne sont pas disponibles, on lui donne une valeur arbitraire. Dans notre cas $m_{ess.\,I} = m_{ess.\,II} = 1{,}2 \angle 0$.

A la deuxième mise en marche (avec masses d'équilibrage de l'essai) les déplacements vibratoires des supports ont subi des variations considérables tant en grandeur qu'en phase, ce qui améliorera les résultats du calcul parce qu'on pourra utiliser des valeurs certaines des variations permettant de réduire de façon notable les erreurs de mesure.

Sélectionnons dans le diagramme la composante symétri-

que A_2' et déterminons le vecteur de la variation $\Delta A_{1-2}' = A_2' - A_1' = 90\angle 150$.

Calculons les masses d'équilibrage nécessaires :

dans le plan I :

$$m_{\text{néc. I}} = m_{\text{ess. I}} \frac{-A_1}{A_2 - A_1} = 1{,}2\angle 0 \cdot \frac{96\angle 22+180}{90\angle 150} = 1{,}28\angle 52\ ;$$

dans le plan II :

$$m_{\text{néc. II}} = m_{\text{néc. I}} = 1{,}28\angle 52.$$

Après avoir enlevé le système de masses d'équilibrage de l'essai, on place sur le rotor le système de masses d'équilibrage calculé et on assure la troisième mise en marche de la machine (voir tableau 1). On voit que la demi-somme des

Tableau 1

Protocole d'équilibrage d'un rotor symétrique à deux supports

nº de la mise en marche	Déplacement vibratoire, μ/degré						Vecteur de la masse d'équilibrage, kg/degré	
	Support I			Support II				
	V	*H*	*A*	*V*	*H*	*A*	dans le plan I	dans le plan II
1	72∠80	100∠350	80∠80	70∠120	120∠50	75∠110	—	—
2	52∠130	36∠50	55∠120	100∠180	140∠90	110∠170	A la mise en marche nº 1 1,2∠0	1,2∠0
3	28∠60	65∠300	30∠60	40∠160	40∠70	45∠160	A la mise en marche nº 1 1,3∠50	1,3∠50
4	20∠350	51∠260	25∠0	50∠140	80∠30	53∠150	A la mise en marche nº 3 1,0∠0	1,0∠130
5	15∠60	28∠310	18∠60	26∠120	25∠30	30∠120	A la mise en marche nº 3 1,0∠270	1,0∠90

déplacements vibratoires horizontaux a subi une réduction notable ($A'_3 = 25 \underline{/333}$, fig. 12) ce qui permet de passer à la compensation de la composante due au déséquilibre des moments.

A la mise en marche initiale (n° 3) la demi-différence des vecteurs des déplacements vibratoires horizontaux est égale à $A''_3 = 48 \underline{/281}$ (voir fig. 13). Plaçons sur le rotor le système de masses d'équilibrage de l'essai : deux masses identiques dont les angles dans les plans de correction diffèrent de 180° l'un de l'autre :

$$m_{ess.\,I} = 1{,}0 \lfloor\underline{0°} \quad \text{et} \quad m_{ess.\,II} = 1{,}0 \lfloor\underline{180°}.$$

Effectuons la mise en marche suivante (n° 4) avec cette paire de masses d'équilibrage.

La variation obtenue au cours de cet essai : $\Delta A'' = A''_4 - A''_3 = 49 \underline{/183}$.

Les masses d'équilibrage nécessaires ont pour valeurs :

$$m_{néc.\,I} = m_{ess.\,I} \frac{-A''_3}{A''_4 - A''_3} = 1{,}0 \lfloor\underline{0°} \cdot \frac{48 \lfloor\underline{281+180}}{49 \lfloor\underline{183}} = 0{,}98 \lfloor\underline{278};$$

$$m_{néc.\,II} = -m_{néc.\,I} = 0{,}98 \lfloor\underline{98}.$$

Avant le placement sur le rotor, les masses ont été légèrement corrigées en grandeur et en angle (voir tableau 1).

La mise en marche (n° 5) du rotor portant deux masses d'équilibrage calculées a permis de constater que les déplacements vibratoires sont considérablement inférieurs à la norme admise (60 microns).

C'est ainsi qu'en présence des deux composantes de déséquilibre, la réalisation de l'équilibrage séparé d'un rotor à deux supports exige cinq mises en marche et, en présence d'une seule composante, trois mises en marche tout comme lors de l'équilibrage dans un seul plan de correction.

Analyse de l'équilibrage

1. En utilisant les valeurs des variations des déplacements vibratoires obtenues entre les mises en marche successives lors de l'équilibrage du rotor, on calcule les sensibilités des déplacements vibratoires aux systèmes de masses

d'équilibrage statique et des moments. On convient de ramener ces sensibilités à l'une des masses faisant partie du système. Les résultats de ces calculs effectués d'après la formule (23) sont rassemblés dans le tableau 2. Les variations

Tableau 2

Calcul des sensibilités

Composantes symétriques des déplacements vibratoires				Composantes symétriques gauches des déplacements vibratoires			
n° de la mise en marche	$\Delta A'$, μ/degré	$\Delta m'$, kg/degré	$\dot{k}'$, $\frac{\mu}{kg}$ /degré	n° de la mise en marche	$\Delta A''$, μ/degré	$\Delta m''$, kg/degré	$\dot{k}''$, $\frac{\mu}{kg}$ /degré
1-2	90 /150	1,2 /0	75 /150	3-4	49 /183	1,0 /0	49 /183
1-3	80 /215	1,3 /50	61 /165	3-5	32 /110	1,0 /270	32 /200
2-3	96 /275	1,1 /110	87 /165	4-5	50 /40	1,4 /225	35 /175

des déplacements vibratoires $\Delta A'$ et $\Delta A''$ sont déterminées à l'aide des diagrammes vectoriels des fig. 12 et 13. Les valeurs moyennes des sensibilités sont : $\dot{k}' = 74$ /160 à la statique et $\dot{k}'' = 39$ /186 au couple.

Il est montré sur la fig. 13 que malgré une dispersion les valeurs des sensibilités $\dot{k}$ sont comprises dans les limites d'un petit triangle hachuré ce qui permet de les ramener à leur moyenne. En dehors des erreurs inévitables lors de la mesure des déplacements vibratoires et de l'installation des masses d'équilibrage, les dispersions sur les sensibilités peuvent être provoquées par la variation non linéaire des déplacements vibratoires en fonction du déséquilibre, par l'instabilité des déplacements vibratoires du rotor due à des conditions inégales de réalisation des mises en marche initiale et suivantes (par exemple la température d'huile différente dans les paliers) et par d'autres causes.

Si l'on constate au cours de l'équilibrage que les valeurs de sensibilité obtenues pour deux étapes successives de l'équilibrage diffèrent considérablement l'une de l'autre, il convient, avant de continuer l'équilibrage, de rechercher et d'éliminer la cause d'une telle instabilité.

En cas d'équilibrage d'une autre machine de même type, la connaissance des sensibilités permet de calculer, au moyen de la formule (24) le système de masses d'équilibrage de l'essai : il ne sera que peu différent du système exigé de sorte que le nombre de mises en marche nécessaire à la réalisation de l'équilibrage diminuera.

2. La connaissance des sensibilités $\dot{k}'$ et $\dot{k}''$ permet également d'entreprendre l'équilibrage séparé, en commençant par la compensation de celle des composantes qui présente une plus grande valeur. L'intérêt d'une telle façon

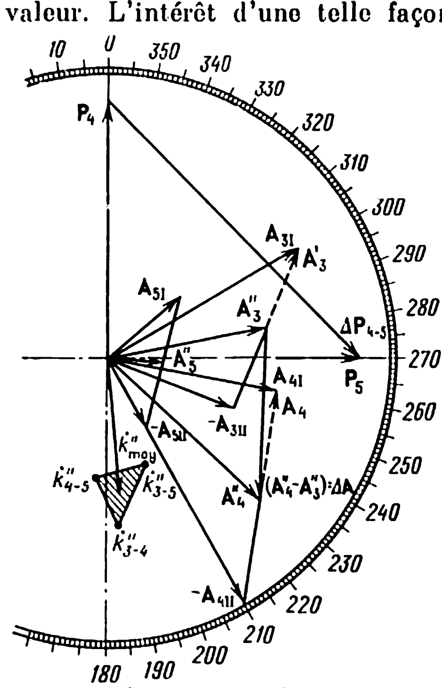


Fig. 13. Diagramme vectoriel lors de l'équilibrage d'après les composantes symétriques gauches des déplacements vibratoires

d'agir réside en ce que lors de la compensation de l'autre composante seront exclues des erreurs provoquées par une installation peu précise de grandes masses d'équilibrage lors de la compensation de la première composante, et qui sont généralement dues à ce que les masses placées de deux côtés sont souvent différentes et les plans axiaux de leur emplacement ne coïncident pas avec la précision voulue.

3. Il s'est avéré que la sensibilité à la statique est $\frac{74}{39} =$ $= 1{,}9$ plus élevée que celle au couple. Un tel rapport caractérise les rotors rigides et s'explique par le fait que pour ces rotors la première vitesse critique est plus voisine de la vitesse nominale de rotation que la deuxième vitesse critique, de sorte que le déséquilibre statique exerce sur les déplacements vibratoires des supports une plus grande influence que le déséquilibre dynamique.

4. Il faut aussi noter ce qui suit: sur les fig. 12 et 13 sont représentées en pointillé celles des composantes de déplacements vibratoires suivant lesquelles l'équilibrage n'est pas effectué lors du cycle donné de mises en marche. Ces vecteurs restent à peu près constants en grandeur et en sens. Cela est dû justement à la propriété de non-interdépendance entre les composantes statique et dynamique du déséquilibre dont nous avons parlé plus haut.

3. Equilibrage d'un rotor rigide asymétrique. Si le rotor de machine électrique est asymétrique par rapport aux supports et au centre des masses, le placement sur un tel rotor d'un système de masses d'équilibrage statique ou des moments provoque une variation simultanée de la demi-somme ou de la demi-différence des déplacements vibratoires des supports et, de ce fait, la méthode d'équilibrage séparé, décrite plus haut, n'est pas applicable aux rotors asymétriques.

L'équilibrage de tels rotors est effectué par une autre méthode qui exige d'ailleurs des calculs plus compliqués. Cette méthode est basée sur le fait que chacun des vecteurs ($\mathbf{A}_{\mathrm{I}}$ et $\mathbf{A}_{\mathrm{II}}$) des déplacements vibratoires peut être considéré comme étant égal à la somme de deux composantes dues aux balourds $\mathbf{m}_{\mathrm{I}}$ et $\mathbf{m}_{\mathrm{II}}$ agissant dans les plans de correction I et II (voir fig. 14).

On peut dans ce cas établir un système d'équations:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{A}_{\mathrm{I}} &= \dot{a}\cdot\mathbf{m}_{\mathrm{I}} + \dot{b}\cdot\mathbf{m}_{\mathrm{II}} \\ \mathbf{A}_{\mathrm{II}} &= \dot{c}\cdot\mathbf{m}_{\mathrm{I}} + \dot{d}\cdot\mathbf{m}_{\mathrm{II}} \end{aligned}\right\},$$

où $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$ et $\dot{d}$ sont les valeurs complexes des sensibilités qui déterminent l'influence exercée par chacun des balourds sur les déplacements vibratoires des supports.

La détermination des vecteurs des balourds $\mathbf{m}_{\mathrm{I}}$ et $\mathbf{m}_{\mathrm{II}}$ d'après les règles générales de résolution d'un système de

deux équations ci-dessus à deux inconnues est une opération graphique et analytique exigeant pour sa réalisation beaucoup de travail et de temps. Aussi, dans la pratique, fait-on des simplifications que nous allons considérer sur des exemples concrets.

Au début de l'équilibrage on détermine les valeurs complexes des sensibilités, en effectuant une mise en marche

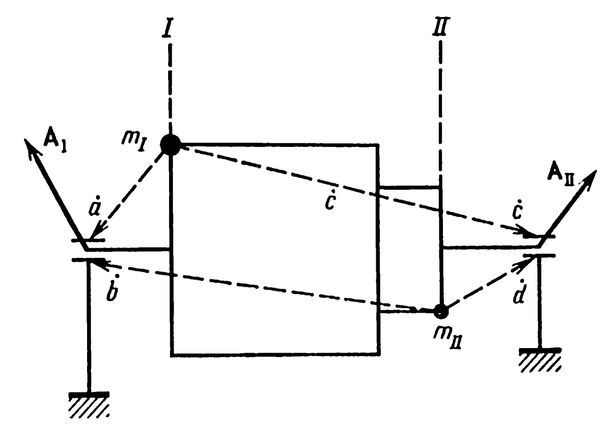


Fig. 14. Rotor asymétrique

initiale du rotor et ensuite, à la même vitesse de rotation adoptée pour l'équilibrage, des mises en marche successives avec une masse d'équilibrage de l'essai placée successive-

Tableau 3

n° de la mise en marche	Déplacements vibratoires des supports, μ/degré		Masses d'équilibrage, kg/degré	
	côté I	côté II	dans le plan I	dans le plan II
1	62 / 265	92 / 105	—	—
2	48 / 342	68 / 155	A la mise en marche n° 1 1,8 / 105	
3	68 / 170	22 / 260	1,8 / 105	A la mise en marche n° 2 1,4 / 10

ment dans chacun des plans de correction. En utilisant les vecteurs des déplacements vibratoires des supports, mesurés au cours de ces essais, on détermine, graphiquement et au moyen de la formule (23), les valeurs complexes des sensibilités $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$ et $\dot{d}$.

Nous donnons, à titre d'exemple, dans le tableau 3 le protocole d'équilibrage d'un rotor asymétrique, sur la

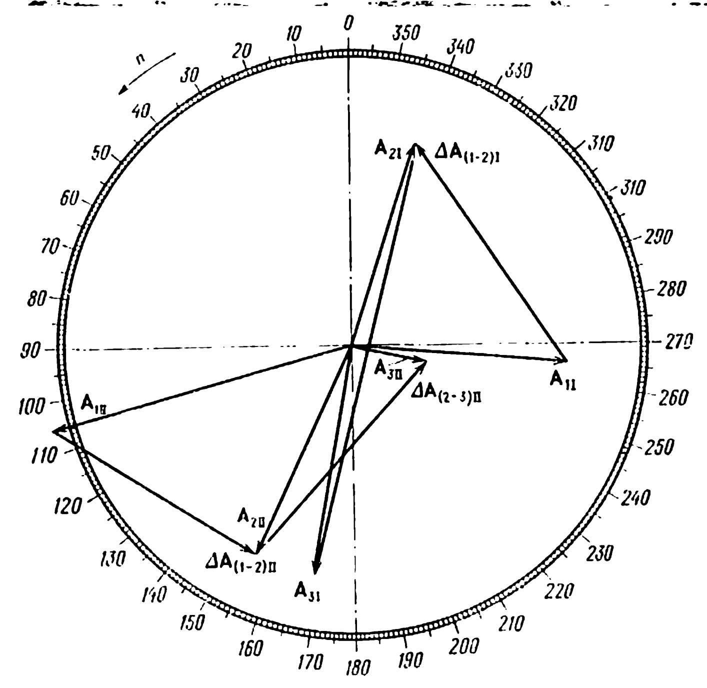


Fig. 15. Constructions vectorielles pour déterminer les valeurs complexes des sensibilités lors de l'équilibrage d'un rotor asymétrique

fig. 15 les constructions nécessaires à la détermination des variations des vecteurs des déplacements vibratoires et, dans le tableau 4, les valeurs complexes des sensibilités calculées d'après la formule (23).

Considérons trois cas des simplifications admises lors de l'équilibrage d'un rotor asymétrique:

a) Les modules des valeurs complexes des sensibilités vérifient les relations: $a \gg c$ et $d \gg b$. Cela signifie que

l'influence des masses d'équilibrage est sensiblement plus forte sur les déplacements vibratoires de l'un des supports que sur ceux de l'autre.

Dans un tel cas il est raisonnable d'appliquer la méthode d'équilibrage dans un seul plan de correction, successivement pour chaque support, c'est-à-dire de supprimer d'abord les déplacements vibratoires de l'un des supports en plaçant les masses d'équilibrage dans un plan de correction et puis les déplacements vibratoires de l'autre support, en utilisant le deuxième plan de correction. Pratiquement, pour réaliser un tel équilibrage, il est tout à fait suffisant que $a/c \cong d/b \cong 2$ à 3.

b) L'un des quatre modules des valeurs complexes des sensibilités est très petit devant les autres ou est voisin de zéro. Cela signifie que la masse d'équilibrage de l'essai influe seulement sur un support lorsqu'elle est placée dans l'un des plans de correction et sur les deux supports si elle est posée dans l'autre plan de correction.

Exemple numérique.

Déplacements vibratoires initiaux des supports:

$$A_{1\mathrm{I}} = 62\,\underline{|265}\,; \quad A_{1\mathrm{II}} = 92\,\underline{|105}.$$

Valeurs complexes des sensibilités:

à la masse d'équilibrage I $\dot a = 38\,\underline{/63}$; $\dot c = 39\,\underline{/132}$;

dans le plan de correction II $\dot b = 8\,\underline{/154}$; $\dot d = 56\,\underline{/308}$.

Dans ce cas il y a aussi avantage d'utiliser pour chacun des supports, à tour de rôle, la méthode d'équilibrage dans un seul plan de correction. Il convient de commencer par le plan dont la masse d'équilibrage influe sur les deux supports (dans notre exemple c'est le plan I), en calculant la masse exigée d'après le déplacement vibratoire du support qui n'est pas influencé par la masse placée dans le deuxième plan de correction (dans notre exemple, le support I):

$$m_{\text{néc. I}} = \frac{-A_{1\mathrm{I}}}{\dot a} = \frac{62\,\underline{|265+180}}{38\,\underline{|63}} = 1{,}63\,\underline{|22}.$$

Plaçons la masse calculée $m_{\text{néc. I}}$ dans le plan I, mettons en marche le rotor et mesurons les déplacements vibratoires: $A_{2\mathrm{I}} = 12\,\underline{/345}$; $A_{2\mathrm{II}} = 142\,\underline{/125}$.

On voit que le déplacement vibratoire a accusé une diminution considérable pour le premier support et une augmentation pour le deuxième support.

Calculons maintenant la masse d'équilibrage nécessaire qui doit être placée dans le plan II pour supprimer le déplacement vibratoire du support II :

$$m_{\text{néc. II}} = \frac{-\dot{A}_{2II}}{\dot{d}} = \frac{142 \underline{| 125+180}}{56 \underline{| 308}} = 2{,}52 \underline{| 358}.$$

Plaçons la masse $m_{\text{néc. II}}$ dans le plan II, mettons en marche le rotor et mesurons les déplacements vibratoires des supports :

$$A_{3I} = 30 \underline{| 180}; \quad A_{3II} = 28 \underline{| 320}.$$

Le déplacement vibratoire du support II a subi une diminution considérable alors que celui du support I est devenu plus grand, mais étant donné la faible valeur de b, il reste dans les limites admises par la norme.

c) Une vibration accrue n'est constatée que pour l'un des supports et le rapport des modules des sensibilités est tel que les simplifications qui viennent d'être considérées ne peuvent pas être admises.

Exemple numérique.

Déplacements vibratoires initiaux des paliers :

$$A_{1I} = 21 \underline{| 265}; \quad A_{1II} = 92 \underline{| 105}.$$

Valeurs complexes des sensibilités : les mêmes que celles indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4

	Valeurs complexes des sensibilités des déplacements vibratoires, $\frac{\mu}{kg} \underline{/ \text{degré}}$	
	Support I	**Support II**
à la masse d'équilibrage dans le plan :		
I	$\dot{a} = 38 \underline{/ 63}$	$\dot{c} = 39 \underline{/ 132}$
II	$\dot{b} = 82 \underline{/ 154}$	$\dot{d} = 56 \underline{/ 308}$

Choisissons un système de masses d'équilibrage dans les plans de correction de manière qu'il ne provoque des déplacements vibratoires que du support II et reste sans effet sur le support I.

La masse d'équilibrage m_I placée dans le plan I provoquera dans le support une variation des déplacements vibratoires $\Delta A_I^I = m_I \cdot \dot{a}$, alors que la masse d'équilibrage m_{II} placée dans le plan II produira dans le même support I une variation de déplacements vibratoires $\Delta A_I^{II} = m_{II} \cdot \dot{b}$. Si $\Delta A_I^I = -\Delta A_I^{II}$, le système de ces masses d'équilibrage n'a pas de répercussion sur le déplacement vibratoire du support I; dans ces conditions, $m_I \cdot \dot{a} = -m_{II}\dot{b}$, c'est-à-dire $m_{II} = m_I \cdot \frac{-\dot{a}}{\dot{b}}$.

Désignons ce système de masses d'équilibrage par le symbole M_I; il n'influe que sur le palier I et comprend une masse quelconque placée dans le plan I et une masse complémentaire placée dans le plan II et obtenue en multipliant la masse m_I par le coefficient complexe $\frac{-\dot{a}}{\dot{b}}$. Ces masses de différente grandeur font un certain angle entre elles.

La variation du déplacement vibratoire du support II produite par le système M_{II} a pour expression:

$$\Delta A_{II} = m_I \cdot \dot{c} + m_I \frac{-\dot{a}}{\dot{b}} \cdot \dot{d} = m_I \left(\dot{c} - \frac{\dot{a}}{\dot{b}} \dot{d} \right),$$

d'où

$$\frac{\Delta A_{II}}{m_I} = \left(\dot{c} - \frac{\dot{a}}{\dot{b}} \cdot \dot{d} \right) = \dot{K}_{II},$$

où $\dot{K}_{II}$ est la valeur complexe de la sensibilité au déplacement vibratoire du support II, ramenée à la masse d'équilibrage placée dans le plan I et faisant partie du système M_{II}.

Cherchons la valeur de $\dot{K}_{II}$:

$$\dot{K}_{II} = \dot{c} - \frac{\dot{a}}{\dot{b}} \cdot \dot{d} = 39\underline{|132} - \frac{38\underline{|63}}{82\underline{|154}} \cdot 56\underline{|308} =$$

$$= 39\underline{|132} - 26\underline{|217} = 45\underline{|96}.$$

La masse d'équilibrage exigée a pour valeur :
pour le plan I :

$$m_{\text{néc. I}} = \frac{92\,\underline{|105+180}}{45\,\underline{|96}} = 2{,}05\,\underline{|189}\,;$$

pour le plan II :

$$m_{\text{néc. II}} = m_{\text{néc. I}} \cdot \frac{-\dot{a}}{\dot{b}} = 2{,}05\,\underline{|189} \cdot \frac{38\,\underline{|63+180}}{82\,\underline{|154}} = 0{,}95\,\underline{|278}.$$

L'essai de mise en marche avec le système M_{II} $(2{,}05\,\underline{/189}\,;\ 0{,}95\,\underline{/278})$ a donné les déplacements vibratoires suivants :

$$A_{II} = 22\,\underline{|270}\,; \quad A_{III} = 13\,\underline{|80}.$$

Dans le cas le plus général de l'équilibrage d'un rotor asymétrique où aucune des simplifications indiquées plus haut ne peut être admise, il convient de réaliser deux fois l'équilibrage décrit sous p. b) : d'abord pour un support et puis pour l'autre.

Les systèmes de masses d'équilibrage n'affectant que l'un des supports et les valeurs complexes correspondantes des sensibilités peuvent s'exprimer comme suit :

pour le support I :

$$M_I = \left(m_I\,;\ m_I \cdot \frac{-\dot{c}}{\dot{d}}\right); \quad \dot{K}_I = \dot{a} - \frac{\dot{c}}{\dot{d}} \cdot \dot{b}\,;$$

pour le support II :

$$M_{II} = \left(m_I\,;\ m_I \cdot \frac{-\dot{a}}{\dot{b}}\right); \quad \dot{K}_{II} = \dot{c} - \frac{\dot{a}}{\dot{b}} \cdot \dot{d}.$$

4. Equilibrage des rotors rigides d'un groupe à deux machines. Dans le cas où les arbres des machines électriques du groupe sont reliés au moyen d'un accouplement élastique, le rotor de chacune des machines peut être équilibré d'après les déplacements vibratoires de ses supports. Si les arbres comportent un accouplement rigide, l'équilibrage séparé de chaque rotor est difficile à réaliser à cause de l'influence réciproque des balourds.

Les rotors reliés par un accouplement rigide d'un groupe symétrique par rapport au plan transversal médian peuvent être équilibrés de façon efficace si on les considère comme

faisant un tout avec un support complémentaire placé au milieu. La composante statique du déséquilibre total des rotors sera supportée essentiellement par le support médian et la composante dynamique par les supports extrêmes. Cela signifie qu'il est judicieux de supprimer le déséquilibre statique résultant d'après le déplacement vibratoire du support médian et le déséquilibre dynamique résultant

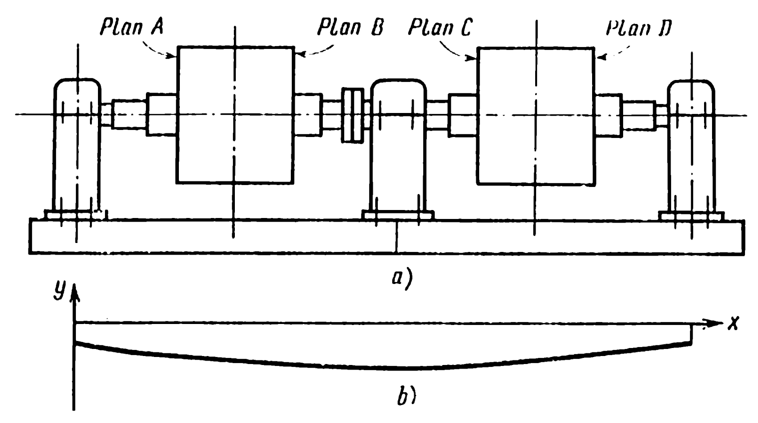


Fig. 16. Schéma d'un groupe de 1250 kVA, 1000 tr/mn (*a*) et forme de la flèche de la ligne d'arbres (*b*)

d'après la demi-différence entre les déplacements vibratoires des supports extrêmes.

Le système de masses d'équilibrage doit être placé symétriquement par rapport au milieu du groupe de machines.

C'est ainsi que l'équilibrage des rotors d'un groupe symétrique se ramène à l'application de la méthode de réduction séparée das composantes du déséquilibre global utilisée pour les rotors symétriques uniques.

Exemple numérique. La fig. 16, *a* représente le schéma d'un groupe dont les rotors sont reliés par un accouplement rigide et prennent appui sur trois supports. Pour le placement des masses d'équilibrage on peut utiliser quatre plans de correction.

Le premier essai, effectué sans poser les masses d'équilibrage (voir protocole dans le tableau 5), a donné les résultats suivants: a) le déplacement vibratoire du support médian dû au déséquilibre statique : $A_{1II} = \underline{170/95}$; b) la demi-diffé-

Tableau 5

Déplacements vibratoires des supports			Masses d'équilibrage	
1	2	3	Plan *B*	Plan *C*
	Essai nº 1			
115/60	170/95	110/85	—	—
	Essai nº 2			
60/70	90/120	70/120	0,95/195	0,95/195
	Essai nº 3			
26/0	22/260	41/200	1,68/225	**1,68**/225

rence entre les déplacements vibratoires des supports extrêmes dus au déséquilibre des moments: $1/2\,(\mathbf{A}_{1I} - \mathbf{A}_{1III}) = 24/349$. Le déplacement vibratoire du support médian étant notablement supérieur à la demi-différence des déplacements vibratoires des supports extrêmes, il convient

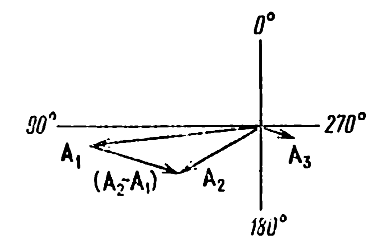


Fig. 17. Constructions vectorielles pour compenser la composante statique du déséquilibre total des rotors

de commencer l'équilibrage par la suppression de la composante statique du déséquilibre.

Avant la deuxième mise en marche on a placé les masses d'équilibrage suivantes: 0,95 kg/195° dans le plan *B* et 0,95 kg/195° dans le plan *C*.

Le déplacement vibratoire du support médian mesuré au cours de la deuxième mise en marche: $\mathbf{A}_2 = 90/120$. Déterminons d'après le diagramme le vecteur $(\mathbf{A}_{2II} - \mathbf{A}_{1II}) = 96/252$ (fig. 17).

Le système de masses d'équilibrage exigée a pour valeur:

$$\mathrm{m}_{\text{néc}} = \mathrm{m}_{\text{ess}} \frac{-\mathrm{A}_{1II}}{\mathrm{A}_{2II} - \mathrm{A}_{1II}} = 1{,}93\,\underline{|\,195}\ \frac{170\,\underline{|\,95+180}}{96\,\underline{|\,252}} = 3{,}42\,\underline{|\,218}.$$

Avant la troisième mise en marche on a placé sur le rotor un système de masses d'équilibrage suivant : $1{,}68\underline{/225}$ dans le plan B et $1{,}68\underline{/225}$ dans le plan C. Les mesures effectuées lors du troisième essai ont permis de constater que tous les déplacements vibratoires des supports sont inférieurs aux normes admises.

Déterminons les valeurs complexes des sensibilités des supports médian et extrêmes par rapport au système statique de masses de correction (tableau 6).

Tableau 6

Mise en marche	$\Delta A_{méd}$, $\mu\,\underline{/\text{degré}}$	ΔA_{ext}, $\mu\,\underline{/\text{degré}}$	Δm, kg $\underline{/\text{degré}}$	$\dot{K}_{méd}$, $\frac{\mu}{kg}\,\underline{/\text{degré}}$	$\dot{K}_{ext}$, $\frac{\mu}{kg}\,\underline{/\text{degré}}$
1-2	$98\underline{/72}$	$62\underline{/49}$	$0{,}95\underline{/195}$	$103\underline{/237}$	$65\underline{/214}$
1-3	$192\underline{/93}$	$118\underline{/71}$	$1{,}68\underline{/225}$	$114\underline{/228}$	$70\underline{/206}$
2-3	$108\underline{/113}$	$66\underline{/90}$	$1{,}0\underline{/255}$	$108\underline{/218}$	$66\underline{/195}$

Les valeurs complexes moyennes des sensibilités sont de $\dot{K}_{méd} = 108\underline{/228}$ pour le support médian et $\dot{K}_{ext} = 67\underline{/205}$ pour les supports extrêmes.

Le module du nombre complexe de la sensibilité du support médian est 1,6 fois celui de la sensibilité des supports extrêmes, bien que la rigidité de ces derniers soit plus faible ; les arguments des nombres complexes des sensibilités sont à peu près identiques de sorte que le placement du système de masses d'équilibrage statique dans les plans B et C assure à la flèche de la ligne d'arbres la forme représentée par la fig. 16, *b*.

Le procédé d'équilibrage des rotors des groupes symétriques que nous venons de décrire est inapplicable aux groupes asymétriques. De même que dans le cas d'un rotor asymétrique unique, l'équilibrage efficace des rotors des groupes asymétriques peut être réalisé en établissant et en résolvant un système d'équations dans lequel le déplacement vibratoire de chaque palier est considéré comme étant égal à la somme des composantes dont chacune représente le résultat d'action du balourd dans un des plans de correction.

K. Equilibrage des rotors souples

La principale difficulté que présente l'équilibrage d'un rotor souple consiste en ce que le placement des masses d'équilibrage seulement dans deux plans de correction ne permet pas de l'équilibrer à toutes les vitesses de rotation.

Dans les constructions électromécaniques on convient de ranger dans la catégorie de rotors souples surtout les rotors de turbo-alternateurs : la vitesse nominale de rotation de ces machines est comprise entre les première et deuxième et, dans les plus grosses machines, entre les deuxième et troisième vitesses critiques. C'est pourquoi, pour assurer une marche normale d'un turbo-alternateur, il suffit de réaliser l'équilibrage suivant deux et, tout au plus, suivant trois formes de la flexion de son arbre [4].

L'équilibrage est effectué successivement à des vitesses critiques inférieures à la vitesse nominale et à celle-ci. Les masses d'équilibrage de l'essai et définitives sont à placer non seulement dans les plans frontaux mais également sur le tambour de rotor (voir rectangles hachurés sur la fig. 8). Les systèmes de masses d'équilibrage représentés sur cette figure sont indépendants l'un de l'autre. Etant placé sur le rotor, chacun d'eux n'influe que sur sa forme de la flexion et est sans effet sur les déplacements vibratoires des autres formes. Lors de l'équilibrage, ces systèmes de masses sont utilisés comme masses de l'essai et comme masses définitives. Les calculs sont effectués au moyen de la formule (22a) en dégageant, lors de l'équilibrage, les composantes symétriques d'après les première et troisième formes de la flexion et les composantes symétriques gauches d'après la deuxième forme.

L'équilibrage d'un arbre souple d'après cette méthode permet de réduire les déplacements vibratoires jusqu'au niveau exigé dans tout l'intervalle de vitesses de rotation, à partir de zéro jusqu'à la vitesse nominale de rotation. Pourtant, un tel équilibrage ne peut être réalisé qu'en usine constructrice, ètant donné que l'accès à la partie centrale du rotor exige de retirer le rotor du stator.

S'il s'avère nécessaire d'équilibrer le rotor d'un turbo-alternateur assemblé, les seuls plans accessibles pour le placement des masses d'équilibrage sont deux plans extrêmes. Dans ce cas, le rotor ne peut être équilibré qu'à l'aide de systèmes de masses d'équilibrage symétriques et symétriques gauches, c'est-à-dire comme un rotor rigide à une

seule vitesse de rotation qui est généralement prise égale à la vitesse nominale de régime.

Pour des rotors avec $n_{\mathrm{II\,cr}} > n_{\mathrm{n}}$, un tel équilibrage est réalisable alors que pour les rotors avec $n_{\mathrm{II\,cr}} < n_{\mathrm{n}} < n_{\mathrm{III\,cr}}$ l'équilibrage au moyen d'un système de masses symétrique, à la vitesse nominale de rotation, peut avoir pour résultat une augmentation des déplacements vibratoires à la première vitesse critique, ce dont on est obligé de s'accomoder lorsqu'il est impossible de transférer les masses d'équilibrage sur le tambour de rotor.

Signalons encore une particularité caractérisant l'équilibrage de rotors souples: dans les machines de certains types, la sensibilité de la composante symétrique des déplacements vibratoires des supports à l'égard d'un système de masses d'équilibrage statique placées dans les plans en bout est si faible que l'équilibrage du rotor au moyen de masses de valeurs acceptables devient impossible à réaliser. De tels cas se présentent avec des rotors pour lesquels la vitesse de rotation dite insensible est voisine de la vitesse d'équilibrage ou est égale à cette dernière; pour réaliser l'équilibrage, il est indispensable de placer les masses de compensation sur le tambour de rotor.

En transférant sur le tambour de rotor un système de masses d'équilibrage d'une forme quelconque, il est nécessaire de reprendre son calcul de manière à pouvoir conserver l'équilibre obtenu auparavant d'après cette forme et à ne pas modifier l'état vibratoire suivant les autres formes. Ce calcul est une opération délicate et bien importante étant donné que la sortie du rotor pour le placement des masses d'équilibrage sur son tambour demande beaucoup de temps et de travail. La méthode à suivre dans ce cas est décrite en détail dans [4].

Pourtant, dans la plupart des cas, l'équilibrage du rotor de turbo-alternateur à la vitesse nominale de rotation peut être réalisé avec succès, en utilisant pour le placement des masses d'équilibrage dans deux plans de correction les mêmes procédés que dans le cas des rotors rigides.

L. Choix et placement d'une masse d'équilibrage de l'essai

Le choix de la masse d'équilibrage de l'essai est une opération bien importante. Théoriquement, la grandeur es l'angle de placement de cette masse peuvent être choisis

arbitrairement. Pourtant, un choix peu heureux peut aboutir à la perte inutile d'une mise en marche: c'est ainsi par exemple qu'une masse d'équilibrage de l'essai trop grande peut provoquer, si elle coïncide avec le balourd initial, une telle augmentation des déplacements vibratoires que la vitesse de rotation du rotor ne pourra être ramenée à la vitesse d'équilibrage. Au contraire, si la masse d'équilibrage est trop petite, la variation des déplacements vibratoires qu'elle provoquera sera de l'ordre de grandeur des erreurs de mesure ce qui ne permettra pas non plus de calculer correctement la valeur de la masse d'équilibrage nécessaire. Dans les deux cas, la mise en marche d'essai devra être reprise.

Pour que le calcul du système de masses d'équilibrage nécessaires, effectué d'après la formule (22a), soit aussi précis que possible, il est nécessaire que la variation des déplacements vibratoires due au placement du système de masses de l'essai soit de l'ordre de grandeur des déplacements vibratoires initiaux. A cet effet, il faut évaluer au préalable, ne serait-ce que d'une façon grossière, le déséquilibre initial. Le système de masses de l'essai peut être évalué avec la meilleure précision en utilisant la sensibilité déterminée d'après les résultats des équilibrages auxquels ont été soumises auparavant des machines analogues (voir les formules 23 et 24).

Dans le cas où la sensibilité n'est pas connue, on peut la calculer d'une façon grossièrement approchée au moyen de la formule empirique suivante:

$$k = \frac{10r}{M}\left(\frac{n}{3000}\right)^2, \tag{26}$$

où k est le *module de la sensibilité d'équilibrage des demi-sommes* ou des demi-différences des déplacements vibratoires des supports à la masse d'équilibrage faisant partie d'un système symétrique ou symétrique gauche, en μ/kg; r le rayon d'emplacement de la masse d'équilibrage, en mm; M la masse du rotor, en t.

Un calcul plus précis exige qu'on connaisse, comme il a été montré dans la section E, les caractéristiques dynamiques du système à équilibrer.

En cas d'un placement heureux de la masse d'équilibrage de l'essai (au droit du balourd), les déplacements vibratoires des supports diminuent, si bien que le rotor peut être équi-

libré d'après l'une des formes de la flexion au cours de sa deuxième mise en marche. Si l'angle d'installation de la masse d'équilibrage de l'essai coïncide avec le déséquilibre initial, le calcul du système de masses d'équilibrage nécessaires peut introduire une erreur complémentaire due à ce que les déplacements vibratoires ne varieront plus linéairement en fonction de la force perturbatrice à cause d'une forte variation de cette dernière.

Aussi, faut-il chercher à placer la masse d'équilibrage de l'essai de manière qu'elle soit disposée par rapport au balourd sous un angle au moins non inférieur à 90°.

Parfois, on peut obtenir une bonne information sur l'endroit du balourd, en portant au crayon un trait de repère sur l'arbre: aux vitesses de rotation inférieures à la vitesse critique, le milieu de ce trait coïncide avec l'endroit du balourd, aux vitesses supérieures à la vitesse critique il se trouve en face du balourd et à la vitesse critique il est de 90° en retard par rapport au balourd.

Pourtant ce n'est pas toujours qu'on peut porter un trait sur le rotor et en outre, cette méthode exige de la part de celui qui effectue l'équilibrage une certaine habitude.

L'angle de phase des déplacements vibratoires des supports mesuré avec un appareil d'équilibrage et le déséquilibre du rotor sont liés par une relation bien déterminée:

$$\varphi_{mes} = \varphi_b + \varphi_{méc} + \varphi_{app} + \varphi_0, \qquad (27)$$

où φ_b est l'angle du balourd compté depuis le rayon zéro dans le sens du traçage angulaire du rotor; $\varphi_{méc}$ la correction angulaire tenant compte du déphasage entre la force perturbatrice produite par le balourd et le déplacement vibratoire du système mécanique rotor-supports; $\varphi_{méc} = 360° - \varphi$ où φ est pris d'après la courbe de la fig. 6, *b* pour $D = 0{,}1$; φ_{app} la correction angulaire liée au déphasage dans l'appareillage utilisé pour les mesures. Elle fait partie du jeu de documents de l'appareil utilisé et se rapporte à la mesure des phases par le procédé stroboscopique. C'est ainsi par exemple que pour l'appareil BIP-5 la correction φ_{app} est prise d'après la courbe de la fig. 18; φ_0 l'angle que font le sens du déplacement vibratoire à mesurer et le rayon zéro du cadran fixe servant à la lecture des phases sur le stroboscope. Elle est lue directement sur ce cadran. (Pour les déplacements vibratoires verticaux $\varphi_0 = 0$ et pour les déplacements horizontaux $\varphi_0 = 90°$ ou 270°.)

De (27) nous obtenons pour la position angulaire du balourd l'expression suivante:

$$\varphi_b = \varphi_{mes} - [\varphi_{méc} + \varphi_{app} + \varphi_0]. \qquad (28)$$

Exemple numérique. Soit à équilibrer un rotor de masse $M = 10$ t, ayant une vitesse nominale de rotation $n = 2\ 250$ tr/mn. La valeur exacte de la vitesse critique de rotation est inconnue, mais la machine appartient à la classe de machines à rotors rigides (prenons $n_n/n_{pr} = 0,5$). Le rayon de placement des masses d'équilibrage $r = 400$ mm.

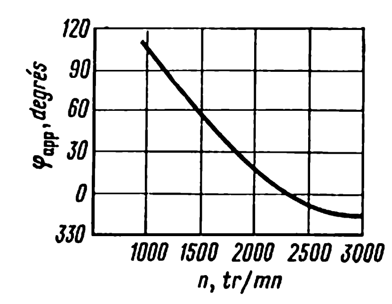


Fig. 18. Correction angulaire pour l'appareil BIP-5

Les déplacements vibratoires verticaux mesurés à la première mise en marche:

$$A_1 = 100/120; \quad A_2 = 120/150.$$

L'équilibrage est effectué à l'aide de l'appareil BIP-5.

On a à déterminer le vecteur du système symétrique de masses d'équilibrage d'essai.

Calculons, à l'aide de la formule (27), les valeurs complexes de la sensibilité:

$$k = \frac{10 \cdot r}{M} \left(\frac{n}{3000}\right)^2 = \frac{10 \cdot 400}{10} (0,75)^2 = 225\ \mu/\text{kg}.$$

Les corrections angulaires: d'après la fig. 6, *b* pour $n_n/n_{pr} = 0,5$; $\varphi = 10°$; $\varphi_{méc} = 360° - 10° = 350°$; d'après la fig. 18 pour $n = 2\ 250$ tr/mn, $\varphi_{app} \cong 0$; pour le déplacement vibratoire vertical $\varphi_0 = 0$.

La demi-somme des déplacements vibratoires des supports a pour valeur:

$$A' = \frac{A_1 + A_2}{2} = 106 \underline{|\ 136}.$$

La masse d'équilibrage de l'essai faisant partie du système statique a pour valeur:

$$m_{ess} = \frac{106}{225} = 0,47 \text{ kg}.$$

L'angle d'installation du système d'équilibrage d'essai donné par la formule (28):

$$\varphi_{néc} = \varphi_b + 180° = 136 - (350 + 0 + 0) + 180 = 326°.$$

Le vecteur $\mathbf{m} \simeq 0,5$ (kg) $\underline{/330°}$.

On voit que pour déterminer par calcul, même d'une façon approchée, la masse d'équilibrage de l'essai il est nécessaire d'avoir diverses caractéristiques de la machine à équilibrer et de l'appareil utilisé. C'est pourquoi, il n'est raisonnable d'effectuer ces calculs que dans le cas où chaque mise en marche de la machine est liée à de grandes pertes de travail et de temps. Sinon, il y a intérêt à faire au cours de l'équilibrage deux ou trois mises en marche complémentaires.

M. Equilibrage dynamique avec la mesure de la seule amplitude crête à crête des déplacements vibratoires

On a parfois à équilibrer dynamiquement le rotor d'une machine sans avoir la possibilité de mesurer la phase des déplacements vibratoires. De tels cas se présentent par exemple lors de l'équilibrage des machines à faible vitesse dont la vitesse de rotation est notablement au-dessous de la gamme de travail des appareils d'équilibrage; l'amplitude crête à crête peut être mesurée, avec une précision suffisante, à l'aide d'un comparateur et, quant à l'angle de phase, on n'arrive pas à le mesurer.

Dans des cas simples, quand il s'agit par exemple de réaliser l'équilibrage par l'emploi de masse d'équilibrage dans un seul plan de correction, l'emploi du seul mesureur d'amplitude permet, bien qu'au prix d'un plus grand nombre de mises en marche, d'obtenir des résultats désirés.

Ci-dessous nous décrivons deux procédés d'un tel équilibrage:

1. Equilibrage avec fixation des masses d'équilibrage dans un seul plan de correction par la méthode du parcours.

2. Equilibrage avec fixation des masses d'équilibrage dans un seul plan de correction par la méthode de deux ou trois mises en marche.

Dans le cas où le rotor doit être équilibré par placement des masses d'équilibrage dans deux plans de correction, sans employer un mesureur des angles de phase des déplacements vibratoires, l'équilibrage est effectué en faisant alterner successivement les cycles d'équilibrage dans un plan de correction tout d'abord à une extrémité du rotor et ensuite à l'autre. Dans ce cas, le nombre de mises en marche nécessaires à la réalisation de l'équilibrage augmente considérablement.

1. **Equilibrage par la méthode du parcours.** Tout d'abord, on mesure les déplacements vibratoires lors de la mise en marche initiale du rotor. Ensuite, la vitesse de la machine

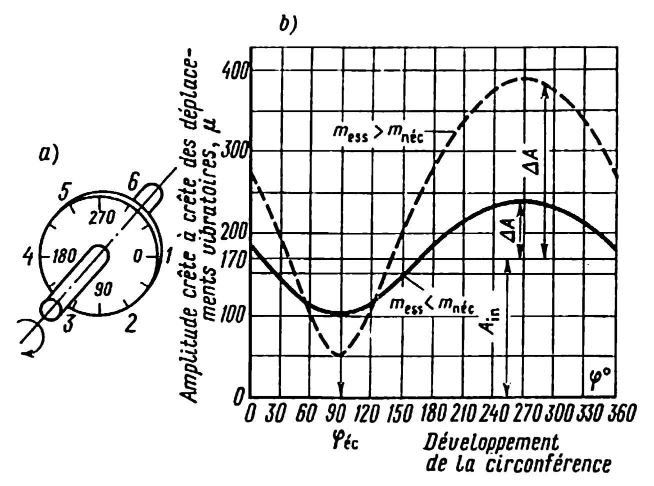


Fig. 19. Equilibrage par la méthode du parcours avec une masse de compensation de l'essai :
a : traçage des plans de correction ; *b* : déplacements vibratoires du palier en fonction de la position de la masse de compensation de l'essai
1, 2, 3 . . . endroits de placement

étant maintenue égale à la vitesse d'équilibrage, on assure des mises en marche du rotor, en plaçant une seule et même masse d'équilibrage de l'essai en plusieurs points de la circonférence, dans le plan de correction. En règle générale, la masse d'équilibrage de l'essai est placée en points séparés par des intervalles angulaires égaux (fig. 19, *a*), bien qu'en principe, ces intervalles puissent être différents.

D'après les résultats des mesures, on trace une courbe traduisant la variation des déplacements vibratoires en fonction de la position angulaire de la masse d'équilibrage sur le rotor $A = f(\varphi_{ess})$. La forme de cette courbe peut varier suivant le rapport qui existe entre la masse d'équilibrage de l'essai et le balourd initial à compenser (fig. 19, *b*). Sur le graphique, on trace une droite parallèle à l'axe des abscisses et correspondant au déplacement vibratoire initial A_{init}.

Pour déterminer la masse de compensation nécessaire on utilise la variation ΔA égale à la différence entre la valeur maximale et la valeur initiale du déplacement vibratoire.

La masse de compensation nécessaire est calculée d'après la formule :

$$m_{néc} = m_{ess} \frac{A_{init}}{\Delta A}. \qquad (29)$$

L'angle d'emplacement de cette masse de compensation dans le plan de correction $\varphi_{néc}$ correspond à la valeur minimale du déplacement vibratoire sur le graphique.

Pour le parcours du plan de correction on peut choisir n'importe quel nombre de points : plus ils sont nombreux, plus exacte sera la détermination du vecteur $\mathbf{m}_{néc}$, mais le nombre de mises en marche à effectuer sera aussi plus élevé. Il n'est pas recommandé de réduire au-dessous de six le nombre de mises en marche avec la masse de compensation de l'essai.

Exemple numérique. Soit à équilibrer un volant dont le déplacement vibratoire initial est de 170 microns. Le parcours du plan de correction avec une masse de compensation de l'essai $m_{ess} = 15$ kg, placée successivement aux six points de 60 en 60° a donné les résultats suivants :

Position angulaire de la masse, degrés	0	60	120	180	240	300
Amplitude crête à crête, microns	185	120	120	185	230	230

D'après le graphique de la fig. 19, *b* (courbe en trait continu), on trouve $\Delta A = 70\mu$; $\varphi_{néc} = 90°$.

La masse de compensation nécessaire a pour valeur

$$m_{néc} = 15 \frac{170}{70} = 36{,}5 \text{ kg}.$$

La fixation sur le volant d'une masse de compensation $\mathbf{m}_{néc} = \underline{36/90°}$ a eu pour effet de réduire le déplacement vibratoire jusqu'à 30 microns.

2. Equilibrage par la méthode de deux ou trois placements d'une masse de compensation de l'essai. Pour l'équilibrage par cette méthode, on assure une mise en marche initiale du rotor sans masse de compensation, une première mise en marche avec la masse de compensation dont le vecteur $\mathbf{m}_{ess1} = m_{ess}\underline{/\varphi_{ess1}}$ et une deuxième mise en marche avec la même masse de compensation mais décalée de 180° par rapport à sa première position, $\mathbf{m}_{ess2} = m_{ess}\underline{/\varphi_{ess2}}$, $\varphi_{ess2} = \varphi_{ess1} + 180°$.

Les amplitudes des déplacements vibratoires mesurées au cours de ces essais sont : $\mathbf{A}_0$, $\mathbf{A}_1$, $\mathbf{A}_2$.

En utilisant le segment de droite *ab*, égal, à une échelle déterminée, à $2\mathbf{A}_0$, on construit un triangle *acb*, dont les

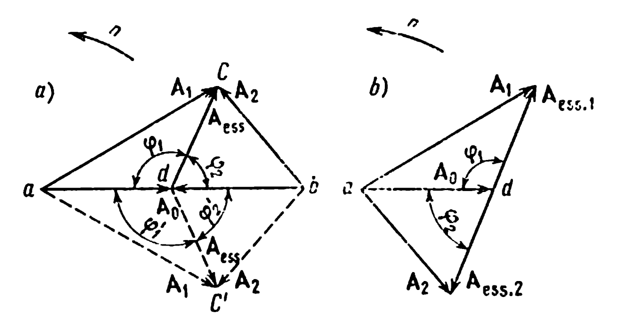


Fig. 20. Diagramme de l'équilibrage par la méthode de deux ou trois mises en marche sans mesurer l'angle de phase des déplacements vibratoires

côtés sont égaux, à la même échelle, à $\mathbf{A}_1$ et $\mathbf{A}_2$ (fig. 20, *a*).

Le vecteur $\mathbf{A}_{ess}$ représenté par la médiane *dc* de ce triangle est égal, à la même échelle, à la variation du déplacement vibratoire produite par la masse de compensation de l'essai. En effet, si le triangle Δcdb est tourné de 180° autour du point *d* (fig. 20, *b*), les vecteurs des déplacements vibratoires initiaux seront amenés en coïncidence alors que les vecteurs de la variation des déplacements vibratoires constatée lors des première et deuxième mises en marche se disposeront sous un angle de 180° l'un par rapport à l'autre, ce qui correspond au déplacement de la masse de compensation de l'essai sur le rotor lors des mises en marche n° 1 et n° 2.

Dans notre exemple :

$$A_0 = 120\mu, \quad A_1 = 180\mu, \quad A_2 = 120\mu,$$

$$m_{ess\,1} = 0{,}22 \,\underline{|60}, \quad m_{ess\,2} = 0{,}22 \,\underline{|240}.$$

D'après le diagramme de la fig. 20, *b*, on trouve $A_{ess} = 96\mu$, les angles de rotation de la masse de compensation de l'essai jusqu'à sa coïncidence avec le vecteur $-\mathbf{A}_0$:

$$\varphi_1 = 112°, \quad \varphi_2 = -68°.$$

La masse de compensation nécessaire a pour valeur :

$$m_{néc} = \frac{A_0}{A_{ess}}\, m_{ess} = \frac{120}{96} \cdot 0{,}22 = 0{,}28 \text{ kg}.$$

L'angle d'emplacement de la masse de compensation nécessaire : $\varphi_{néc} = \varphi_{ess\,1} + \varphi_1 = 60 + 112 = 172°$ ou à partir du deuxième triangle : $\varphi_{néc} = \varphi_{ess\,2} + \varphi_2 = 240 - 68 = 172°$.

Pourtant, le résultat ainsi obtenu n'est pas univoque parce que la construction d'un triangle par trois côtés donnés comporte une autre solution — $\Delta abc'$ représentée en pointillé sur la fig. 20, *a*. Il est à noter que la grandeur du vecteur $\mathbf{A}_{ess}$ reste inchangée alors que les angles dont doit être tourné le vecteur de la masse de compensation de l'essai seront différents : $\varphi_1 = -112°$, $\varphi_2 = 68°$.

Par conséquent, la valeur de la masse de compensation de l'essai sera la même que dans la première solution alors que l'angle de son emplacement variera : $\varphi_{néc} = \varphi_{ess\,1} + \varphi_1 = 60 - 112 = 308°$.

Pour déterminer lequel de ces angles $\varphi_{néc}$ obtenus est bon, on doit procéder à une mise en marche complémentaire : si le placement de la masse $m_{néc}$ sous l'un de ces angles fait croître les déplacements vibratoires, elle doit être mise sous l'autre angle.

N. Masses de compensation

Comme il a été montré aux sections G et I, le nombre de plans de correction nécessaire à l'équilibrage d'un rotor dépend des caractéristiques dynamiques du système rotor-supports.

C'est pourquoi, la construction de la machine prévoit généralement les endroits d'emplacement, le type et le procédé de fixation des masses de compensation.

Sur les faces frontales de divers organes de rotors et d'induits (bagues de centrage, ventilateurs, collecteurs, etc.) on utilise par exemple des rainures circulaires de section trapézoïdale pour les masses de compensation représentées par la fig. 21 (d'après l'usine « Elektrossila »). Les

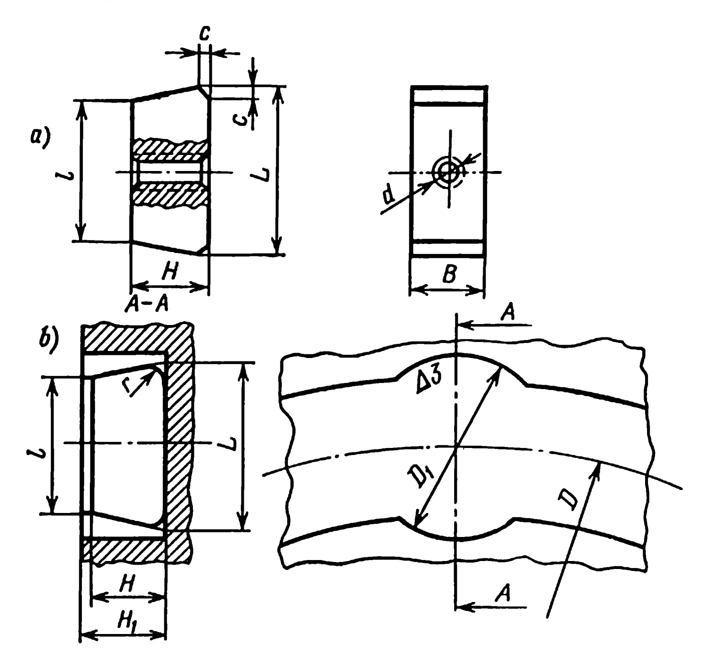


Fig. 21. *a*: masses de compensation normalisées pour les rainures circulaires en bout ; *b*: profil des rainures en bout

caractéristiques de ces masses de compensation sont rassemblées dans le tableau 7.

La fig. 22 montre une masse de compensation appliquée, fixée sur le rotor 1 au moyen des boulons 3 à tête de profil trapézoïdal, de l'écrou 4 et de la rondelle d'arrêt 5. En plus de ces rainures destinées aux masses de compensation trapézoïdales, on prévoit dans les gros turbo-alternateurs encore des trous taraudés dans les cales d'encoches pour les bouchons d'équilibrage (en cas de refroidissement indirect des enroulements). Si les enroulements sont refroidis directement, les orifices taraudés sont pratiqués dans les grandes dents,

Masse de compensation							Encoche						
Cotes nominales, mm						Masse, g	Cotes nominales, mm						
L	l	B	H	d	c		L	l	H	H_1	D_1	r	D
15	11,0	10	10		2,5	8	15	11,0	10	11	18	2,5	Donnée par le constructeur
21	16,2	12				18,7	21	16,2			25		
				M6									
		10	12			20,0			12	14			
26	21,2						26	21,2			30		
		12				24,0							
		13				40,0							
31	24,6				3		31	24,6			36		
												3,0	
		16	16			49,7			16	18			
				M8		47,4							
		13											
36	29,6						36	29,6			40		
		16				60,0							
		14				68,0							
41	33,8		18				41	33,8	18	20	45		
		18				88,0							

En dehors des constructions unifiées de masses de compensation que nous venons de considérer, on emploie aussi, dans les machines, des masses de compensation plates en acier de diverses formes qui sont fixées à l'intérieur des étoiles d'induit ou de rotor ou sur leurs faces frontales. Si ces masses ne sont pas soudées, elles sont placées avec une butée dans des logements spécialement prévus à cet effet et sont fixées avec sûreté au moyen de boulons munis de dispositifs protégeant contre un dévissage intempestif.

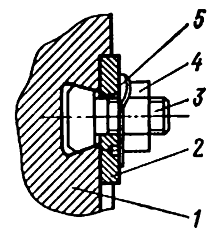


Fig. 22. Masse de compensation appliquée

Dans des cas exceptionnels où la masse de compensation ne peut pas être fixée avec butée, le serrage normal des boulons doit assurer entre le boulon et le corps en rotation une force de frottement supérieure à la force centrifuge provoquée par la masse de compensation tournante, c'est-à-dire :

$$mr\omega^2 \leqslant fks\sigma_{tr}, \qquad (30)$$

où m est la masse de compensation, en kg ; r la distance du centre de la masse à l'axe de rotation, en m ; f le coefficient de frottement acier sur acier ; k le nombre de boulons ; s la section de la tige du boulon, en cm^2 ; σ_{tr} la contrainte de traction admissible, en N/cm^2.

Pour $f = 0,3$ et $\sigma_{tr} \cong 10^4$ N/cm^2, l'aire nécessaire de la section droite du boulon est donnée par la formule :

$$s \geqslant \frac{33mr}{k} \left(\frac{n}{3000}\right)^2 \; [\mathrm{cm}^2]. \qquad (31)$$

Si sa section vérifie cette formule, le boulon ne doit pas être soumis à l'essai de cisaillement parce que $\sigma_{cis} \cong \cong 0,6\ \sigma_{tr}$.

Exemple numérique. On donne : la masse de compensation $m = 35,4$ kg ; $r = 0,7$ m ; $n = 375$ tr/mn ; $k = 4$. On demande de déterminer les dimensions des boulons de fixation.

La section de la tige du boulon :

$$s = \frac{33mr}{k} \left(\frac{n}{3000}\right)^2 = \frac{33 \cdot 35,4 \cdot 0,7}{4} \cdot \left(\frac{375}{3000}\right)^2 = 3,2\ [\mathrm{cm}^2].$$

Le diamètre de la tige du boulon :

$$d = \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^2}{0,785}} = 20,2 \text{ mm}.$$

On peut prendre les boulons M24.

Après avoir réalisé l'équilibrage, il convient de remplacer les masses de compensation temporaires par les masses permanentes.

La fixation par soudage des masses de compensation n'est admissible que dans des endroits non accessibles au personnel d'exploitation. Les masses de compensation accessibles doivent être rendues amovibles, pour faciliter le placement des masses de compensation complémentaires au cours des mises au point de l'équilibrage du rotor (de l'induit) pendant l'exploitation ultérieure.

Les masses de compensation tant permanentes que temporaires ne doivent être placées que dans des endroits prévus par la construction de la machine.

Les masses de compensation sont parfois posées sur un grand arc de circonférence. Un tel placement étant peu efficace et encombrant le plan de correction, il y a intérêt à remplacer, autant que possible, les masses de compensation réparties par une masse concentrée dont la grandeur et la position angulaire sont déterminées par la somme géométrique des masses de compensation distinctes considérées comme vecteurs.

S'il est nécessaire de déplacer dans le même sens radial une masse de compensation m_1 dont le centre est à la distance r_1 de l'axe de rotation, elle doit être remplacée par une masse :

$$m_2 = m_1 \frac{r_1}{r_2}, \tag{32}$$

où r_1 et r_2 sont les distances des centres de ces masses à l'axe de rotation.

ANNEXE 15

Choix des lubrifiants pour les paliers de machines électriques

Pour la lubrification des paliers il convient toujours d'utiliser l'huile recommandée par le constructeur de la machine et surtout dans le cas des grosses machines. La qualité de l'huile à employer doit satisfaire aux normes correspondantes et faire l'objet d'un contrôle en laboratoire. Si les prescriptions du constructeur manquent, il convient de choisir les qualités d'huile en se guidant des considérations exposées ci-dessous.

Il est bien connu que le but principal de la lubrification consiste à produire un frottement fluide qui ne peut être obtenu que pour une pression bien déterminée dans le film d'huile de graissage. Or, toutes choses étant égales par ailleurs, cette pression est proportionnelle à la viscosité de l'huile et à la vitesse circonférentielle du tourillon de l'arbre. Aux vitesses circonférentielles élevées, la pression exigée peut être obtenue avec une plus faible viscosité de l'huile

et au contraire, aux vitesses circonférentielles faibles, cette pression s'obtient avec une plus grande viscosité de l'huile. En outre, on doit également prendre en considération le régime de fonctionnement de la machine; c'est ainsi par exemple qu'en cas des démarrages fréquents et des inversions fréquentes du sens de marche, on emploie des huiles plus visqueuses parce que la période de frottement demi-fluide liée à la faible vitesse de rotation et aux arrêts se trouve dans ce cas réduite.

Une huile plus visqueuse favorise la formation du coin d'huile ce qui signifie que, toutes choses étant égales par ailleurs, le frottement fluide intervient pour une plus faible vitesse de rotation, lorsque l'huile est plus visqueuse.

En procédant au choix de l'huile pour les paliers, il convient de prendre en considération la charge des paliers (pression spécifique) et la température du milieu ambiant : plus grande est la charge du palier et plus élevée est la température de l'ambiance, plus visqueuse doit être l'huile à employer. Pourtant on ne devra pas employer une huile plus visqueuse que cela n'est nécessaire, sinon on risquera d'augmenter les pertes par frottement qui sont proportionnelles à la viscosité de l'huile de graissage. On voit donc que c'est sa viscosité qui est la propriété essentielle de l'huile déterminant son adaptation aux diverses machines pour des services donnés.

On convient de déterminer la viscosité en degrés (Engler). On appelle viscosité en degrés d'un liquide un nombre qui indique combien de fois le temps mis par ce liquide pour s'écouler est supérieur au temps d'écoulement du même volume d'eau. Pour unité, on prend le temps d'écoulement, par son propre poids, de 200 cm^3 d'eau à 20 °C à travers le tube d'un viscosimètre. Puisque la viscosité de l'huile varie fortement en fonction de la température, elle est toujours rapportée à une température déterminée, par exemple à 50 °C. Le choix de cette dernière s'explique par le fait que la viscosité de l'huile varie brusquement lorsque sa température s'élève jusqu'à 50 °C environ et plus lentement à partir de 50 °C.

Les propriétés physiques et chimiques des huiles employées pour la lubrification des paliers de machines électriques sont rassemblées dans le tableau 1 où, en plus de la viscosité, sont donnés d'autres indices caractérisant la qualité des huiles. Les données approchées nécessaires au

Tableau .

Caractéristiques des huiles employées pour les paliers lisses de machines électriques

Propriétés physiques et chimiques	Huiles industrielles (pour machines et à broches) d'après GOST 1707-51				Huiles à turbines d'après GOST 32-53 *	
	« 12 » (huile à broches « 2 »)	« 20 » (huile à broches « 3 »)	« 30 » (huile pour machines « L »)	« 45 » (huile pour machines « S »)	Huile à turbines « 22 » (huile à turbines « L »)	Huile à turbines « 30 » (huile à turbines « UT »)
Viscosité à 50 °C :						
a) cinématique en centistokes, dans les limites de	10 à 14	17 à 23	27 à 33	38 à 52	20 à 23	28 à 32
b) relative correspondante en degrés, dans les limites de	1,86 à 2,26	2,60 à 3,31	3,81 à 4,59	5,24 à 7,07	—	—
Pouvoir cokéfiant, en pour cent, maxi	—	—	0,2	0,3	—	—
Indice d'acide en mg de KOH par 1 g d'huile, maxi	0,14	0,14	0,2	0,35	0,02	0,02
Teneur en cendres, en pour cent, maxi	0,007	0,007	0,007	0,007	0,005	0,005
Teneur en acides et alcalis solubles dans l'eau . . .	—	—	—	nulle	—	—
Teneur en impuretés mécaniques, en pour cent, maxi	—	—	0,007	0,007	—	—
Teneur en eau	nulle	nulle	nulle	nulle	nulle	nulle
Température d'inflammation dans un creuset ouvert, en °C, mini . .	165	170	180	190	180	180
Température de congélation, en °C, maxi . . .	—30	—20	—15	—10	—15	—10

choix des marques d'huile pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW à graissage par bagues sont rassemblées dans le tableau 2 qui indique la viscosité à 50 °C et la marque d'huile recommandée. Pour les machines de petite puissance (jusqu'à 100 kW) à graissage par bagues on peut employer, indépendamment de la vitesse et du régime de fonctionne-

Tableau 2

Marques d'huile pour les paliers à graissage par bagues de machines électriques

Vitesse de rotation et régime de fonctionnement de la machine	Machines d'une puissance de 100 à 1000 kW		Machines d'une puissance supérieure à 1000 kW	
	Viscosité en degrés	Marque d'huile	Viscosité en degrés	Marque d'huile
1. Supérieure à 1000 tr/mn : a) à un seul sens de marche, à démarrages peu fréquents	3,0 à 3,5	Huile industrielle « 20 » (huile à broches « 3 »)	3,0 à 3,5	Huile industrielle « 20 » (huile à broches « 3 »)
b) à deux sens de marche, à démarrages fréquents	4,0 à 4,5	Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)	4,0 à 4,5	Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)
2. De 250 à 1000 tr/mn : a) à un seul sens de marche, à démarrages peu fréquents	4,0 à 4,5	Huile industrielle 30 (huile pour machines « L »)	4,0 à 4,5	Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)
b) à deux sens de marche, à démarrages fréquents	4,0 à 4,5	Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)	5,5 à 6,5	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S »)
3. Jusqu'à 250 tr/mn : à un seul et à deux sens de marche	5,5 à 6,5	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S »)	5,5 à 6,5	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S »)

Tableau 8

Mélanges d'huiles de graissage

Viscosité du mélange en degrés, à 50 °C	Marques d'huiles mélangées	Proportions des huiles mélangées en parties
3	1. Huile industrielle « 12 » (huile à broches « 2 »)	1
	Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)	2
	2. Huile industrielle « 12 » (huile à broches « 2 »)	11
	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S »)	9
4	1. Huile industrielle « 12 » (huile à broches « 2 »)	3
	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S»)	7
	2. Huile industrielle « 20 » (huile à broches « 3 »)	1
	Huile industrielle « 45 » (huile pour machines « S »)	1
	3. Huile industrielle « 20 » (huile à broches « 3 »)	2
	Huile de moteur « 10 »	1
6	1. Huile industrielle « 12 » (huile à broches « 2 »)	1
	Huile de moteur « 10 »	6
	2. Huile industrielle « 30 » (huile pour machines « L »)	2
	Huile de moteur « 10 »	3

ment, une huile ayant une viscosité de 3,0 à 3,5 degrés à 50 °C. C'est l'huile à broches « 3 » qui possède la viscosité exigée dans ce cas.

Pour les paliers à graissage par circulation, on emploie surtout les huiles pour turbines : pour les paliers de machines tournant à grande vitesse supérieure à 1000 tr/mn, l'huile pour turbine « L » (légère) et pour les paliers des machines ayant une vitesse de 250 à 1000 tr/mn, une huile pour turbine « UT » (lourde). Pour la lubrification des paliers de turbo-

Tableau 4

Graisses pour les paliers de machines électriques

Dénomination de la graisse	Composition	Viscosité efficace maximale à 0 °C, en poises	Résistance limite minimale, gf/cm²	Teneur en eau maximale, %	Teneur en impuretés mécaniques maximale, %	Alcalinité ramenée maximale, %
1. Lubrifiant gras, à haut point de fusion « 1-13 »	D'après GOST 1631-61	5000 d'après GOST 7163-54	1,5 à 80 °C	0,75	nulle	0,2
2. Graisse universelle à point de fusion moyen, résistant à l'eau, d'après GOST 4366-64 marques :	D'après GOST 4366-64	D'aprés GOST 7163-63	A 50 °C			
press-solidol « C »		1000	1,0	2,5	0,25	0,2
solidol « C » (graisse УCc automobile)		2000	2,0	2,5	0,3	0,2
3. Graisse plastique ЭШ176 d'après TУ 38-1-01-96-70	D'après TУ 38-1-01-96-70	40 mini à 50 °C	2,5	Traces	—	0,15

alternateurs on emploie la même huile que pour les paliers de turbines.

Une huile à viscosité exigée peut être obtenue par mélange de différentes huiles. Le tableau 3 donne les proportions de celles-ci pour obtenir un mélange à viscosité déterminée. En faisant varier les proportions, on peut obtenir des viscosités non indiquées dans le tableau.

Les graisses recommandées pour la lubrification des paliers à roulements de machines électriques sont indiquées dans le tableau 4.

ANNEXE 16

Limites de l'échauffement admissible des machines électriques et des transformateurs

(Extrait des Normes GOST 183-74, 533-76; 5616-72; 11677-65)

A. Machines électriques

Les limites de l'échauffement admissible de différents organes des machines électriques au-dessus de la température de +40 °C du milieu gazeux de refroidissement, pour une altitude au-dessus du niveau de la mer non supérieure à 1000 m, doivent être celles indiquées dans le tableau 1, conformément aux normes techniques générales prescrites par GOST 183-74, à condition qu'elles ne soient pas spécifiées dans les normes relatives à certaines catégories de machines.

B. Turbo-alternateurs

En régime nominal continu des turbo-alternateurs avec des charges indiquées dans les normes GOST 533-76, les températures limites des parties actives et constructives des turbo-alternateurs, en contact avec les isolants, ne doivent pas être supérieures à celles indiquées dans les normes GOST 8865-70.

Dans ces conditions, les températures limites pour les isolants des classes B et F ne doivent pas dépasser celles indiquées dans le tableau 2.

Tableau 1

Organes des machines électriques	Classes d'isolants d'après GOST 8865-70														
	A			E			B			F			H		
	Echauffement admissible en °C en cas de mesure par :														
	T	*R*	*I*	*T*	*R*	*I*	*T*	*R*	*I*	*T*	*R*	*I*	*T*	*R*	*I*
1. Enroulements à courant alternatif des machines d'une puissance de 5000 kVA et plus avec une longueur du noyau de 1 m et plus	—	60	60	—	70	70	—	80	80	—	100	100	—	125	125
2. Enroulements : a) enroulements à courant alternatif des machines d'une puissance inférieure à 5000 kVA ou avec une longueur du noyau inférieure à 1 m; b) enroulements d'excitation des machines à courant continu et alternatif à excitation en courant continu sauf ceux indiqués aux pp. 3, 4, 5 du présent tableau; c) enroulements d'induits connectés au collecteur	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
3. Enroulements d'excitation des machines à pôles lisses excitées en courant continu	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	110	—	—	—	—
4. Enroulements :															

a) enroulements d'excitation simple couche à surfaces dénudées ; b) enroulements en barres des rotors de machines asynchrones	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
5. Enroulements d'excitation à faible résistance comportant plusieurs étages et enroulements de compensation	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
6. Enroulements isolés, fermés continuellement sur eux-mêmes	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
7. Enroulements non isolés, continuellement fermés sur eux-mêmes 8. Noyaux et autres parties en fer ne se trouvant pas en contact avec les enroulements	L'échauffement de ces organes ne doit pas atteindre une valeur pouvant créer un danger de détérioration des isolants ou des autres matériaux														
9. Noyaux et autres parties de fer en contact avec les enroulements	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
10. Collecteurs et bagues collectrices non protégés et protégés	60	—	—	75	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

La température des paliers ne doit pas dépasser les valeurs maximales admissibles suivantes :
paliers lisses . . . . . 80 °C (la température de l'huile ne devant pas dépasser 65 °C)
paliers à roulements . . . . . 100 °C.

On peut tolérer des températures plus élevées si l'on emploie des paliers à roulements spéciaux ou des huiles de qualité spéciale avec des coussinets faits en matériaux correspondants.

Légende. *T* : mesure par thermomètre
R : mesure par résistance
I : mesure par indicateurs de température placés entre les bobines dans une seule encoche.

Tableau 2

Organes des turbo-alternateurs ou fluide de refroidissement	Méthode de mesure					
	Résistance	Thermomètres à résistances placés entre les bobines dans l'encoche, sur le fond de l'encoche et sous le coin	Thermomètre	Résistance	Thermomètres à résistances placés entre les bobines dans l'encoche, sur le fond de l'encoche et sous le coin	Thermomètre
	Classe B			Classe F		
	°C, maxi					
1. Température du fluide de refroidissement à la sortie de l'enroulement du stator, du rotor et du noyau du stator	—	—	85	—	—	85
2. Température du gaz de refroidissement sortant de l'enroulement et du noyau du stator	—	—	95	—	—	130
3. Enroulements statoriques:						
a) à refroidissement indirect	—	105	—	—	140	—
b) à refroidissement direct:						
par gaz	—	105	—	—	140	—
par liquide	—	105	—	—	140	—
4. Enroulement rotorique:						
a) à refroidissement indirect	130	—	—	145	—	—
b) à refroidissement direct:						
avec échappement dans 2 zones au plus	100	—	—	115	—	—
avec échappement dans 3 à 5 zones	105	—	—	120	—	—
avec échappement dans 6 ou 7 zones	110	—	—	125	—	—
avec échappement dans 8 zones et plus suivant la longueur du rotor	115	—	—	130	—	—
5. Fer actif du noyau de stator	—	105	—	—	140	—

Notes. 1. Lorsqu'on emploie pour les enroulements des turbo-alternateurs classe d'isolants B d'après les normes GOST 8865-70 les matières liantes thermodurcissables de classe d'échauffement non inférieure à la classe B ou des liants thermoplastiques à température de ramollissement de +130 °C et plus d'après GOST 11506-65, les limites admissibles indiquées dans le tableau 2 pour la température de l'enroulement statorique, du fer actif du noyau statorique

ainsi que la température du gaz de refroidissement sortant de l'enroulement et du noyau de stator peuvent être augmentées de 15 °C.

2. La température limite de l'enroulement rotorique à refroidissement direct par liquide est indiquée, en cas de sa mesure par la méthode de la résistance, dans la notice technique des turbo-alternateurs.

3. La mesure de la température par la méthode des thermomètres à résistances placés sous les cales ne se rapporte qu'à l'enroulement refroidi par liquide.

4. Lorsque l'enroulement est refroidi directement par gaz, la ventilation du rotor est caractérisée par le nombre de zones radiales d'échappement du gaz sur toute la longueur du rotor. Les zones d'échappement du gaz de refroidissement des têtes de bobines d'un seul côté du rotor sont comptées pour une seule. Les zones communes d'échappement du fluide de refroidissement de deux flux dirigés dans des sens axiaux opposés sont considérées comme deux zones.

Les caractéristiques nominales des turbo-alternateurs doivent être valables pour le service continu dans les conditions suivantes :

— la température de l'eau de refroidissement admise dans les réfrigérants de gaz ou, en cas d'emploi d'échangeurs de chaleur, dans le premier échangeur du côté d'arrivée de l'eau de refroidissement, appelée par la suite « eau de refroidissement » est de +33 °C ;

— la température du gaz de refroidissement (air ou hydrogène) à la sortie du réfrigérant de gaz est de +40 °C;

— la température d'entrée du liquide de refroidissement (eau ou huile) utilisé pour le refroidissement direct des machines électriques ou de leurs organes constitutifs est de +40 °C ;

— l'altitude au-dessus du niveau de la mer du lieu d'installation des machines n'est pas supérieure à 1000 m.

C. Alternateurs hydrauliques

Lors du service continu des alternateurs hydrauliques avec des charges nominales, les échauffements admissibles de leurs parties actives ne doivent pas être supérieurs à ceux indiqués dans les normes GOST 183-74 pour les classes d'isolants correspondantes.

Les températures maximales admissibles en cas d'emploi des isolants des classes B et F et des températures de l'air

Tableau 3

Organes de l'alternateur hydraulique ou fluide de refroidissement	Températures maximales admissibles en cas d'emploi des isolants de classes d'échauffement, °C					
	B			F		
	Méthode de mesure					
	R	*TR*	*T*	*R*	*TR*	*T*
1. Température de l'eau de refroidissement à la sortie des enroulements statorique, rotorique et du noyau du stator	—	—	85	—	—	85
2. Enroulement statorique :						
a) à refroidissement indirect par air et à isolation :						
en ruban micacé imprégné de compound	—	105	—	—	—	—
thermodurcissable	—	120	—	—	140	—
b) à refroidissement direct par eau et à isolation :						
en ruban micacé imprégné de compound	—	105	—	—	—	—
thermodurcissable	—	120	—	—	140	—
3. Enroulement rotorique						
a) à refroidissement indirect par air	130	—	—	145	—	—
b) à refroidissement forcé par air	130	—	—	145	—	—
4. Fer actif du noyau du stator :						
a) en cas de refroidissement indirect par air de l'enroulement statorique et à isolation :						
en ruban micacé imprégné de compound	—	105	—	—	—	—
thermodurcissable	—	120	—	—	140	—
b) en cas de refroidissement direct par eau de l'enroulement statorique et à isolation :						
en ruban micacé imprégné de compound	—	105	—	—	—	—
thermodurcissable	—	120	—	—	140	—

Légende. *R* : par résistance ; *TR* : par thermomètres à résistance ; *T* : par thermomètre.

Notes. 1. Pour la mesure des températures par la méthode des thermomètres à résistance, on place ces derniers entre les bobines dans l'encoche et sur le fond de l'encoche en cas des enroulements statoriques à deux couches et sous la cale en cas des enroulements statoriques à simple couche.

2. La température admissible de l'enroulement rotorique, mesurée par la méthode de la résistance en cas de refroidissement direct par eau est indiquée dans la notice d'utilisation de l'alternateur hydraulique.

de refroidissement indiquées dans les normes GOST 5616-72 ne doivent pas être supérieures à celles données dans le tableau 3.

D. Transformateurs

D'après les normes techniques générales énoncées dans GOST 11677-65, les transformateurs d'alimentation triphasés à l'huile sont destinés à être utilisés dans les conditions suivantes :

a) altitude au-dessus du niveau de la mer d'après GOST 1516-60 ;

b) température du milieu de refroidissement : pour l'eau : non supérieure à +25 °C à l'entrée du réfrigérant ; pour l'air : la température de l'air de refroidissement variable de façon naturelle ne doit pas être supérieure à +40 °C ; en outre, la température journalière moyenne ne doit pas dépasser +30 °C et la température moyenne de l'année +20 °C ;

c) la température de l'air abmbiant : non inférieure à —45 °C.

L'échauffement admissible de différentes parties d'un transformateur à huile au-dessus de la température des agents de refroidissement (air ou eau) mesurée lors des essais thermiques (sur la dérivation principale) effectués d'après n'importe laquelle des méthodes préconisées par les normes GOST 3484-65 ne doit pas dépasser les valeurs indiquées dans le tableau 4.

Tableau 4

Organes du transformateur	Echauffement admissible, °C	Méthode de mesure
Enroulements	65	Par variation de la résistance
Surfaces du circuit magnétique et des organes constructifs	75	Par thermomètre
Huile (couches supérieures) :		
cuve hermétique ou munie d'un dispositif à protéger l'huile contre tout contact avec l'air extérieur	60	Par thermomètre
autres cas	55	Par thermomètre

ANNEXE 17

Essai de rigidité diélectrique des enroulements de machines électriques. Valeur admissible de la résistance d'isolement des enroulements

(Extrait des Normes GOST 183-74, 533-76)

A. Rigidité diélectrique entre enroulements et masse et entre enroulements

Les isolants entre enroulements et masse de la machine et entre enroulements doivent supporter pendant une minute, sans se détériorer, une tension d'épreuve à la fréquence de 50 Hz, de forme pratiquement sinusoïdale et de valeur indiquée dans le tableau 1.

Une machine complètement assemblée, ayant subi cet essai, n'est pas à soumettre à un nouvel essai sous cette tension.

Pour les machines d'une puissance de 1000 kW (1000 kVA) et plus, d'une tension de 3000 V et plus, il est admis, avec l'accord de l'utilisateur, d'effectuer un essai de rigidité diélectrique supplémentaire sous une tension redressée égale à 1,6 fois la valeur efficace de la tension alternative indiquée dans le tableau 1.

L'isolation entre enroulements et masse et entre enroulements (phases) des machines électriques placés en totalité ou en partie sur le lieu d'installation doit supporter pendant 1 mn une tension d'épreuve égale à 100 % de la tension d'épreuve indiquée dans le tableau 1.

Toutes les machines électriques, qu'elles aient été soumises ou non à l'essai de rigidité diélectrique, en état assemblé ou par parties, en isine du constructeur, sous la tension d'épreuve indiquée dans le tableau 1, doivent être soumises à l'état assemblé (avant la mise en service après l'installation) pendant 1 mn à l'essai de rigidité diélectrique sous une tension égale à 80 % de la tension d'épreuve indiquée dans le tableau 1. Cet essai sur le lieu d'installation est obligatoire pour les turbo-alternateurs, les alternateurs hydrauliques et les compensateurs synchrones; pour les

Désignation de la machine ou de ses organes	Tension d'épreuve (valeur efficace)
1. Machines d'une puissance inférieure à 1 kW (ou 1 kVA) à tension nominale inférieure à 100 V, sauf celles indiquées sous pp. 4 à 8 du présent tableau	500 V plus deux fois la tension nominale
2. Machines d'une puissance de 1 kW (ou 1 kVA) et plus à tension nominale inférieure à 100 V, sauf celles indiquées sous p. 4	1000 V plus deux fois la tension nominale
3. Machines : a) d'une puissance jusqu'à 1000 kW (ou 1000 kVA) sauf celles indiquées sous pp. 1, 2, 4 à 8	1000 V plus deux fois la tension nominale mais non inférieure à 1500 V
b) d'une puissance de 1000 kW (ou 1000 kVA) et plus, sauf celles indiquées sous pp. 4 à 8 à tension nominale :	
jusqu'à 3300 V inclus	1000 V plus deux fois la tension nominale
de 3300 exclus à 6600 V inclus	deux fois et demie la tension nominale
de 6600 exclus à 17000 V inclus	3000 V plus deux fois la tension nominale
supérieure à 17000 V	valeur arrêtée d'un commun accord entre le constructeur et l'exploitant
4. Enroulements inducteurs des machines à courant continu à excitation indépendante	1000 V plus deux fois la tension nominale d'excitation non inférieure à 1500 V
5. Enroulements inducteurs des machines synchrones :	
a) alternateurs, moteurs et compensateurs mis en marche à l'aide de moteurs de démarrage spéciaux	dix fois la tension nominale d'excitation de la machine électrique mais non inférieure à 1500 V et supérieure à 3500 V
b) machines destinées au démarrage direct avec l'enroulement inducteur fermé sur une résistance non supérieure à dix fois la résistance de l'enroulement inducteur en courant continu ou sur la source qui l'alimente	dix fois la tension nominale d'excitation de la machine électrique mais non inférieure à 1500 et non supérieure à 3500 V
c) machines destinées au démarrage avec l'enroulement inducteur fermé sur une résistance dont la valeur est égale ou supérieure à dix fois la résistance de l'enroulement ou avec l'enroulement inducteur ouvert qu'il soit fractionné ou non	1000 V plus deux fois la valeur efficace maximale de la tension obtenue dans les conditions données de démarrage entre les bornes de l'enroulement inducteur (entre les extrémités d'une section quelconque) mais non inférieure à 1500 V (voir note 3)

Désignation de la machine ou de ses organes	Tension d'épreuve (valeur efficace)
6. Enroulements secondaires des moteurs asynchrones en court-circuit non permanent :	
a) moteurs permettant le freinage par contre-courant	1000 V plus quatre fois la tension nominale de l'enroulement secondaire
b) moteurs non destinés au freinage par contre-courant	1000 V plus deux fois la tension nominale de l'enroulement secondaire
7. Excitatrices (sauf celles indiquées plus loin). Excitatrices des moteurs synchrones (y compris les moteurs asynchrones synchronisés) si, pendant le démarrage, elles sont mises à la terre ou débranchées des enroulements inducteurs	La même que pour les enroulements auxquels sont branchées les excitatrices : 1000 V plus deux fois la tension nominale de l'excitatrice mais non inférieure à 1500 V
8. Machines et appareils électriques couplés en groupes	Si l'on soumet à l'essai un groupe de plusieurs machines ou appareils neufs, qui viennent d'être installés et couplés ensemble, dont chaque machine et chaque appareil ont été soumis à l'essai de rigidité diélectrique, la tension d'épreuve ne doit pas dépasser 85% de la tension d'épreuve de la machine (ou de l'appareil) pour laquelle (lequel) cette tension est la plus petite

Notes :

1. La tension d'épreuve pour les machines à différents niveaux d'isolement est déterminée par un accord entre le constructeur et l'exploitant.

2. Dans le cas des enroulements diphasés comportant une sortie commune, la tension nominale d'après laquelle on détermine la tension d'épreuve doit être prise égale à 1,4 fois la tension de phase.

3. La tension obtenue dans les conditions de démarrage entre les bornes des enroulements inducteurs ou entre les extrémités des sections peut être mesurée sous une tension d'alimentation réduite. La tension ainsi mesurée doit être multipliée par le rapport de la tension obtenue dans les conditions de démarrage à la tension d'alimentation réduite.

4. Pour les enroulements d'une seule ou plusieurs machines qui sont électriquement liées entre elles, la tension à considérer est la tension maximale par rapport à la terre.

Il est admis de procéder, avec l'accord de l'exploitant, à un essai complémentaire sous une tension redressée égale à 1,28 fois la valeur de la tension alternative indiquée dans le tableau 1.

Avant de procéder à l'essai sous une tension élevée, il est nécessaire de vérifier la résistance d'isolement des enroulements et, s'il y a lieu, d'assurer leur séchage.

---

autres machines il n'est effectué que sur demande de l'exploitant.

On peut ne pas procéder à cet essai si les machines placées en totalité ou en partie sur le lieu d'installation ont été essayées, après leur placement sur le socle, sous 100 % de la tension d'épreuve indiquée dans le tableau 1.

B. Rigidité diélectrique de l'isolation entre spires des enroulements

L'isolation entre spires voisines de l'enroulement doit supporter pendant 3 mn un essai sous une tension augmentée. Cet essai est effectué en marche à vide de la machine, en augmentant soit la tension d'alimentation (essai lors du fonctionnement en moteur) soit la tension produite (essai lors du fonctionnement en génératrice) de 30 % au-dessus de la tension nominale.

Dans le cas des machines électriques dont le courant à vide peut dépasser le courant nominal, pour une tension égale à 1,3 fois la tension nominale, la durée de l'essai peut être réduite jusqu'à 1 mn.

Pour les alternateurs hydrauliques, l'isolation entre spires voisines de l'enroulement doit supporter pendant 5 mn une augmentation de la tension de 50 % au-dessus de la tension nominale.

Pour les turbo-alternateurs, l'isolation entre spires voisines de l'enroulement doit supporter pendant 5 mn une augmentation de la tension de 30 % au-dessus de la tension nominale.

Pour les machines synchrones (à l'exception des turbo-alternateurs et des alternateurs hydrauliques) dont la tension à vide, pour le courant nominal d'excitation, est de plus de 30 % supérieure à la tension nominale. l'essai est

effectué sous la tension à vide correspondant au courant nominal d'excitation.

Pour les machines électriques comportant plus de quatre pôles l'augmentation de la tension d'épreuve ne doit pas être supérieure à la valeur pour laquelle la tension moyenne entre deux lames consécutives du collecteur est égale à 24 V.

Pour les excitatrices prévues pour un forçage d'excitation au cours duquel la tension débitée par l'excitatrice dépasse de plus de 30 % sa tension nominale, l'essai est effectué pendant 1 mn sous la tension limite de forçage.

Pour les moteurs asynchrones triphasés à rotor bobiné, l'essai de rigidité diélectrique de l'enroulement rotorique doit être effectué sur le rotor immobile et ouvert.

Lorsque la tension est augmentée de 30 et 50 %, on tolérera une augmentation simultanée de la fréquence du courant alternatif: si l'essai est effectué sur une machine électrique en rotation, l'augmentation de la fréquence ne doit pas être supérieure à 15 % de sa valeur nominale.

Pour les machines comportant des sections à plusieurs spires, de tension nominale jusqu'à 660 V inclus, on admet l'emploi des dispositifs basés sur le principe d'utilisation d'une haute fréquence ou d'une fréquence accrue.

C. Résistance d'isolement des enroulements des machines électriques

La résistance d'isolement des enroulements d'une machine électrique par rapport à la masse et entre enroulements est établie dans les Normes d'Etat ou les normes techniques relatives à des types concrets de machine.

La résistance d'isolement r en mégohms d'un turbo-alternateur, entre enroulements et masse et entre enroulements, à la température de service de calcul du turbo-alternateur est à déterminer par la formule:

$$r = \frac{U}{1000 + \frac{P}{100}},$$

où U est la tension nominale de l'enroulement du turbo-alternateur, en V; P la puissance nominale du turbo-alternateur, en kVA.

La résistance d'isolement déterminée au moyen de cette formule à une température inférieure à la température de service de calcul doit être doublée tous les 20 °C complets ou incomplets de la différence entre la température de service de calcul et la température à laquelle a été faite la mesure.

La résistance d'isolement des enroulements d'un turbo-alternateur ne doit en aucun cas être inférieure à 0,5 mégohm.

INDEX ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

À NOS LECTEURS

Les Editions Mir vous seraient très reconnaissantes de bien vouloir leur communiquer votre opinion sur le contenu de ce livre, sa traduction et sa présentation, ainsi que toute autre suggestion.

Notre adresse: Editions Mir,
2, Pervi Rijski péréoulok,
Moscou, I-110, GSP, U.R.S.S.

Imprimé en Union Soviétique